Rechnerunterstützte Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufs

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Jürgen Jacobs

aus Birkesdorf j. Düren

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Wulf Schwanhäußer
Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Walter Oberschelp

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Februar 2003

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 15

2 Grundlagen der Disposition 17

2.1 Fahrplankonstruktion 17
2.1.1 Manuelle Fahrplankonstruktion 18
2.1.2 Rechnerunterstützte Fahrplankonstruktion 20

2.2 Überwachung des Betriebsgeschehens 23
2.2.1 Zeitliche Entwicklung der Betriebsleitstellen 26

2.3 Grundlegende Dispositionsregeln 27
2.3.1 Vorrangregelungen 28
2.3.2 Wartezeitregelungen 28
2.3.3 Umlaufproblematik 30
2.3.4 Dispositive Maßnahmen 31

3 Wahrnehmung der Dispositionsaufgaben 34

3.1 Aufgaben einer Zugüberwachung 34

3.2 Manuelle Zugüberwachung 34
3.2.1 Belegblattdrucker 36

3.3 Rechnerunterstützte Zugüberwachung 37
3.3.1 Zeit-Weg-Linien-Darstellung 40
3.3.2 Streckenspiegel-Darstellung 41
3.3.3 Zeitliche Entwicklung der RZü 42

3.4 Betriebszentralen der Deutschen Bahn 44
3.4.1 Bedienplatzsystem BPS 901 45
3.4.2 Zugnummernmeldesystem ZNS 901 47
3.4.3 Zuglenksystem ZLS 901 47
3.4.4 Dispositionssysteme der BZ 49
3.4.5 Systemanforderungen 54
3.4.6 Vorteile der BZ 55
3.4.7 Zeitliche Entwicklung der BZ 56

3.5 Netzleitzentrale 57
3.5.1 Graphische Streckenübersicht 58
3.5.2 Knotenübersicht 58
3.5.3 Bahnhofsfahrordnung 60

3.6 Betriebsleitsysteme im Ausland 60
3.6.1 Österreichische Bundesbahnen (ÖBB) 60
3.6.2 Schweizerische Bundesbahnen (SBB) 61

4 Ansätze zur automatischen Disposition 65

4.1 Anforderungen an eine automatische Disposition 65
4.1.1 Übergeordnete Disposition 66
4.1.2 Berücksichtigung aktueller Gegebenheiten 66
4.1.3 Einlegen von Sonderzügen 68

4.2 Simulationsverfahren für den Eisenbahnbetrieb 69
4.2.1 Einsatzbereiche 69
4.2.2 Simulation der Fahrplanerstellung 70
4.2.3 Simulation des Betriebsablaufs 71

4.3 Synchrone Verfahren 73
4.3.1 SIMU VII 74
4.3.2 SIMU ++ / RailSys 76

4.4 Asynchrone Verfahren ... 78
4.4.1 STRESI ... 79
4.4.2 NSIM ... 81
4.4.3 BABSI ... 83

4.5 Ansatz des Konsortiums für die BZ der DB Netz AG ... 84

4.6 Andere Ansätze ... 87
4.6.1 Regelbasierte Zuglenklogik für Zuglenkanlagen ... 87
4.6.2 Wissensbasierte Entscheidungsunterstützung ... 88
4.6.3 Steuerung durch dezentrale autonome Agenten ... 90
4.6.4 RegiDisp ... 91
4.6.5 Lineare Optimierung ... 92
4.6.6 Numerische Simulation ... 94

5 Konzeption eines neuen Dispositionsverfahrens ... 96

5.1 Schwachstellen der bisher eingesetzten Systeme ... 96

5.2 Grundidee des neuen Verfahrens ... 98

5.3 Grundlagen des neuen Dispositionsverfahrens ... 99
5.3.1 Sperrzeitenbasierter Ansatz ... 100
5.3.2 Der SPURPLAN-Graph ... 102
5.3.3 FAKTUS/RUT-0 ... 104

5.4 Unterschiede zur Fahrplankonstruktion ... 104
5.4.1 Infrastruktureinschränkungen ... 105
5.4.2 Veränderung der Zugeigenschaften ... 105

5.5 Fahrplanmäßige und dispositive Daten ... 107

5.6 Fahrzeitrechnung ... 107
5.6.1 Fahrzeitzuschläge ... 108
5.6.2 Haltezeiten ... 108
5.6.3 Sonderzuschläge ... 109
5.6.4 Verhalten im Verspätungsfall ... 109

6 Entwicklung der neuen Algorithmen 111

6.1 Der Einlegealgorithmus 111
6.1.1 Synchrone Algorithmen 112
6.1.2 Bisherige asynchrone Algorithmen 113
6.1.3 Neuer asynchroner Algorithmus für ASDIS 114

6.2 Fahrwegsuchalgorithmus 115
6.2.1 Abbildung der Fahrwege in SPURPLAN 115
6.2.2 Ermittlung alternativer Laufwege 116

6.3 Verwendung von Mindestzugfolgezeiten 116

6.4 Partieller Vorrang 119

6.5 Konfliktlösungsalgorithmus 120
6.5.1 Lösungsmöglichkeiten 121
6.5.2 Bestimmung des Überholungsabschnitts 121
6.5.3 Verwendung von Betriebshalten 124
6.5.4 Berechnung der „Mindestzugfolgezeiten“ 125
6.5.5 Entscheidungskriterium, welcher Zug warten muß 129
6.5.6 Haltezeitverlängerung bestimmen 133
6.5.7 Fahrwegalternativen suchen 133
6.5.8 Erweiterung des Überholungsabschnitts 135

6.6 Ablaufdiagramm des Algorithmus 136

6.7 Synchrones Element in asynchronen Verfahren 137

6.8 Behandlung von Anschluß- bzw. Umlaufkonflikten 139

6.9 Kommunikation mit dem realen Betriebsgeschehen 141
6.9.1 Zuglaufmeldungen 141
6.9.2 Übernahme der Fahrplandaten 141
6.9.3 Bestimmung der zu erwartenden Zuglaufmeldungen 141
6.9.4 Vergleich der Zuglaufmeldungen 142

7 Das Dispositionsverfahren ASDIS/L 144

7.1 Kopplung zwischen ASDIS/L und ZLM 144

7.1.1 Erzeugung der Zuglaufmeldungen (ZLM) 144

7.2 Das Programm ASDIS/L 148

7.3 Das Programm ZLM 153

7.4 Anwendungsmöglichkeiten 154

7.5 Visionen für die Zukunft 156

7.5.1 Genauere Ortung 156

7.5.2 Verzicht auf die operationelle Ebene der Stellwerke 157

8 Zusammenfassung und Ausblick 159

9 Abbildungsverzeichnis 161

10 Abkürzungsverzeichnis 163

11 Literaturverzeichnis 165

Rechnerunterstützte Konfliktermittlung und Entscheidungsunterstützung bei der Disposition des Zuglaufs

– Zusammenfassung –

Die Eisenbahnen entwickeln sich immer mehr zu einem modernen und leistungsfähigen Verkehrsunternehmen. Dabei muß sich die Bahn marktorientierten Grundsätzen unterwerfen. Neben der sicheren und pünktlichen Abwicklung des Betriebes sollen auch Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit gewährleistet sein.

Die zentrale Rolle bei der Betriebsführung stellt die Zuglaufdisposition dar. Die Disponenten entscheiden über Zugreihenfolge auf den Strecken und weisen bei Verspätungen die Fahrdienstleiter an, die Reihenfolge zu tauschen. Dabei gilt es, der Pünktlichkeit und der Wirtschaftlichkeit des Betriebes stets Rechnung zu tragen.

Für qualitativ hochwertige Dispositionsentscheidungen muß die Datengrundlage für die Konfliktermittlung entscheidend verbessert werden, denn nur aufgrund einer exakten Ermittlung kann eine Konfliktlösung ein hohes Qualitätsniveau erreichen. Durch Anwendung vom Methoden des Trassenmanagements – aufbauend auf der Fahrplanfeinkonstruktion mit einer genauen Fahrzeitrechnung und auf Sperrzeitenbasis – können im Betriebsablauf neue Dispositionsfahrpläne erstellt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals dieser Ansatz für die Dispositionsunterstützung bei der Betriebsabwicklung von Eisenbahnen angewendet. Der Einsatz von Methoden des rechnerunterstützten Trassenmanagements und die Anwendung des asynchronen Ansatzes führen zu einem neuen Dispositionsverfahren ASDIS.

Mit Hilfe dieses neu konzipierten Verfahrens ASDIS können konfliktfreie Dispositionsfahrpläne erstellt werden. Diese Dispositionsfahrpläne beruhen auf den Gegebenheiten des aktuellen Betriebsgeschehens. Bei jeder Abweichung vom derzeit aktuellen Dispositionsfahrplans wird, falls aus den Abweichungen Konflikte entstehen, ein neuer Dispositionsfahrplan konstruiert. Auf Grund einer exakten Fahrzeitrechnung, die auch das Kürzen der Fahrzeitzuschläge im Verspätungsfall beinhaltet, kann eine genaue Prognose für die weiteren Fahrtverläufe der Züge erstellt werden. Mit Hilfe der asynchronen Vorgehensweise können Konflikte erkannt und gelöst werden, die erst in weiterer Zukunft auftreten werden. Dadurch kann eine weiträumige Disposition realisiert werden.

Durch die Einführung einer automatischen Disposition in den Betriebszentralen kann nicht nur Rationalisierungspotential erschlossen sondern auch eine Verbesserung der Produktivität, der Qualität und der Flexibilität in der Betriebsführung erzielt werden.

Computer-aided identification of train-path conflicts and 'on-the-spot' train path allocation

– Summary –

While developing into modern and efficient organisations, railway companies are subject to market principles. Railway operation must be safe and on time, but must also be conducted efficiently and economically.

Among the various aspects of operational control of railways, 'on-the-spot' (i. e. very short-term) train-path management plays an especially important role. In this process the 'path managers' decide about the sequence of the trains running on a network or parts of it. This is to be distinguished from the dispatchers, whose authorities are restricted to their respective signal box areas, and the timetable managers, who are responsible for long-term scheduling.

In case of significant delays, a train-path manager may advise a dispatcher (who remains responsible for the safe dispatching of trains) to alter the sequence of trains with the aim of improving punctuality and efficiency.

However, the quality of this conflict solution hinges on the quality of the data input from trains and infrastructure and on the quality of the 'on-the-spot' decision making required. Improving both has been the aim of this paper.

The unique idea of this paper is to use the well-tried techniques of computer-aided timetable construction (long-term path management) for the automatic generation of 'on-the-spot' timetables supporting the decisions of train-path managers. The accurate modelling of the infrastructure and the exact calculation of occupation times have long been available in (long-term) scheduling and can be used for the exact calculation of timetables 'on-the-spot', as long-term scheduling and short-term train-path management are virtually the same processes but for different time corridors.

The ASDIS program generates those 'on-the-spot' timetables automatically and gives the train-path managers the choice of either implementing them directly or devising a human-made modified solution. The timetables are free of conflicts between trains, as are their long-term counterparts, but are derived directly from the current state of operation. All subsequent changes of the state of operation lead to an update of the 'on-the-spot' timetable. The running time calculation takes into account the fact that delayed trains can make up some of their lost time by using slack built in the scheduled running time, so that an exact forecast of the actual schedule of the trains will be made.

Even conflicts between trains that are bound to develop in the future can be recognised and solved early because the program applies the technique of asynchronous

simulation, whereby train paths are not calculated on a strict sequential basis, but in the order given by the train hierarchies. This enables the program to be used for the 'on-the-spot' scheduling of trains in wider areas.

Thus the automatic 'on-the-spot' scheduling of trains made possible by the ASDIS program contributes to an improvement of productivity, quality and flexibility in railway operation and supports its rationalisation.

Распознавание конфликтов и принятие диспетчерских решений на комьютерной основе

Краткое содержание

Национальные железнодорожные компании находятся в настоящее время в стадии интенсивного развития и постепенно вырастают до уровня высокопроизводительных современных предприятий, подчиняясь при этом принципам рыночной экономики. Их задачей является не только надёжно и точно выполнять железнодорожные перевозки, но и делать это эффективно и рентабельно.

Одну из главных ролей в работе железнодорожных системам играет диспетчерское управление движением поездов. Диспетчеры принимают решения о порядке следования поездов на перегонах и при задержках дают указания к изменению этого порядка. При этом они должны одновременно принимать во внимание пунктуальность железнодорожных перевозок и экономические факторы.

Для повышения качества диспетчерских решений необходимо принципиально улучшить информационную основу для распознавания конфликтов между трассами поездов – только таким образом возможно достичь высокого качества их разрешения. Путём целевого применения методов планирования движения поездов на основе компьютерной системы разработки детальных железнодорожных планов с интегрированным расчётом времени движения и с учетом блокируемых элементов возможна актуализация диспетчерских планов в режиме реального времени.

В данной работе впервые рассматривается применение такого способа диспетчерской поддержки для управления процессом железнодорожных перевозок. Комбинация компьютеризированного подхода к планированию движения поездов с асинхронным методом разрешения конфликтных ситуаций является основой диспетчерской системы нового поколения ASDIS.

С её помощью возможно составлять бесконфликтные диспетчерские планы движения поездов, основанные на конкретной ситуации на перегонах и узловых станциях железнодорожной сети. При любом отклонении от актуального расписания движения, если это отклонение приводит к конфликту между предусмотренными трассами поездов, производится автоматический расчёт нового диспетчерского плана. Благодаря точному методу расчёта времени движения и, в случае запаздывания, возможности сокращения

предусмотренных в расписании временных надбавок, возможо сделать достоверный прогноз о дальнейшем движении поездов. Асинхронный подход позволяет распознавать и своевременно разрешать конфликтные ситуации, которые возникнут как ближайшем, так и в более отдалённом будущем. Таким образом автоматизированное диспетчерское управление может распространяется на обширные участки сети.

Внедрение автоматической диспетчерской системы в централизированных пунктах управления процессом перевозок приведёт не только к значительной рационализации управления движением поездов, но и позволит улучшить производительность, качество и гибкость железнодорожной системы вцелом.

Aide en ligne à la détection et la résolution des conflicts de circulation pour la régulation des circulation ferroviaires

– Résumé –

Les chemins de fers s'évoluent de plus en plus en entreprises de transport modernes et productives. Ils doivent se soumettre aux principes du marché. À coté de la sécurité et la ponctualité du traffic la productivité et la rentabilité sont à garantir.

Le point-clé de l'exploitation est la régulation des circulation. Les régulateurs en exploitation décident de la suite des trains sur les lignes et donnent en cas de retards des commandes aux aiguilleurs de changer la suite des trains. Les régulateurs sont en charge de la ponctualité et la productivité du traffic.

Les données pour la détection des conflicts doivent être perfectionnées parcque seulement une détection exacte peut garantir des résolutions de haute qualité. En applicant des outils existants de la gestion des horaires – basée sur la planification des horaires avec le calcul exact des temps de parcours et les temps d'óccupation – des nouveaux horaires de régulation peuvent être construites.

Dans l'étude présentée cette méthode à l'aide de régulation est pour la première fois appliqué dans la domaine de la gestion des circulation ferroviaires. L'usage des outils introduits dans la domaine de la gestion des horaires et l'application de la méthode asynchrone mènent à la nouvelle méthode de régulation ASDIS (« Asynchrone Disposition »).

À l'aide de la nouvelle méthode ASDIS des horaires de régulation sans conflicts de circulation peuvent être construits. Ces horaires de régulations sont basés sur les données du traffic actuel. Chaque déviation de l'horaire de régulation actuel – en cas de conflicts de circulation résultant de cette déviation – provoque la construction d'un nouveau horaire de régulation. A cause du calcul exact des temps de parcours qui tient compte de la réduction des temps réserves compris dans l`horaire en cas de rétards une pronostic exacte pour les futur trajets des trains peut être réalisée. À l'aide de la méthode asynchrone des futurs conflicts peuvent être identifiés et résolus et on peut réaliser une régulation étendu.

L'introduction de la régulation automatisée dans les centrales d'exploitation (« Betriebszentralen ») n'ouvre pas seulement une potentiel de rationalisation mais mène aussi à une amélioration de la productivité, de la qualité et de la flexibilité de la gestion des circulations.

1 Einleitung

Auf dem Weg zu einem modernen und kundenorientierten Verkehrsunternehmen müssen die Eisenbahnen neben der sicheren und pünktlichen Abwicklung des Betriebes auch Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit gewährleisten.

Im Eisenbahnwesen hat sich aufgrund der langen Bremswege bei hohen Geschwindigkeiten das „Fahren im Raumabstand“ durchgesetzt. Die damit verbundenen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Zugfahrten durch die Signal- und Sicherungstechnik müssen bei einer rechnerunterstützten Abbildung des Betriebsablaufs berücksichtigt werden. Die Eisenbahnen stellen ein spurgeführtes System dar, welches extern gesteuert ist. So werden die Fahrstraßen durch die Stellwerke vorgegeben und die Zugreihenfolge ausschließlich an geeigneten Betriebsstellen geändert. Über die Zugreihefolge kann nur ein Disponent entscheiden, der zuverlässige Informationen über den Betriebsablauf in einem größeren Bereich besitzt.

Somit ergibt sich für die Disposition eine zentrale Rolle bei der Betriebsführung. Die Disponenten entscheiden über Zugreihenfolge auf den Strecken und weisen bei Verspätungen die Fahrdienstleiter an, die Reihenfolge zu tauschen. Dabei gilt es der Pünktlichkeit und der Wirtschaftlichkeit des Betriebes stets Rechnung zu tragen.

Die Grundlage für den Betriebsablauf sind die im Trassenmanagement konstruierten Fahrpläne. Im Trassenmanagement hat sich die rechnerunterstützte Fahrplankonstruktion auf Sperrzeitenbasis seit einigen Jahren durchgesetzt. Bei der Disposition ist die Rechnerunterstützung bislang auf die Anzeige aktualisierter Zeit-Weg-Linien beschränkt. Durch den Verzicht auf eine exakte Fahrzeitrechnung und der Darstellung der Sperrzeitentreppen ist die Konfliktermittlung insbesondere für weiter entfernt liegende Konflikte zu ungenau, da sonst die Abweichungen der geplanten Zeit-Weg-Linien von den zukünftig gefahrenen zu groß werden.

Für qualitativ hochwertige Dispositionsentscheidungen muß die Datengrundlage für die Konfliktermittlung entscheidend verbessert werden, denn nur aufgrund einer exakten Ermittlung kann eine Konfliktlösung ein hohes Qualitätsniveau erreichen. Durch Anwendung vom Methoden des Trassenmanagements – aufbauend auf die Fahrplanfeinkonstruktion – können im Betriebsablauf neue Dispositionsfahrpläne erstellt werden. Durch eine hierarchische Vorgehensweise ist es möglich, auch ferne Konflikte zu erkennen und nicht nur die Konflikte, die wenige Blockabschnitte voraus liegen. Dies und die Erfassung der augenblicklichen Situation sind für eine gute automatische Disposition unabdingbare Voraussetzungen. Denn gerade bei größeren

Störungen ist es für die Disponenten schwierig den Überblick zu behalten und die Qualität der Betriebsführung sicherzustellen. In solchen Fällen kann eine weitreichende Automation den Disponenten unterstützen und entlasten. Durch die Einführung einer automatischen Disposition kann nicht nur Rationalisierungspotential erschlossen werden sondern auch eine Verbesserung der Produktivität, der Qualität und der Flexibilität in der Betriebsführung erzielt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neues Verfahren zur Disposition des Betriebsablaufs entwickelt. Durch die Berücksichtigung der Daten aus dem aktuellen Betriebsgeschehen können konfliktfreie Dispositionsfahrpläne automatisch erstellt werden, die dann direkt zur Steuerung des Betriebes einsetzbar sind. Dabei werden erstmals Grundlagen des Trassenmanagements für die Konstruktion der Dispositionsfahrpläne angewendet.

Zunächst werden die Grundlagen der Disposition und deren heutigen Anwendung bei der DB Netz AG erläutert. Ausgehend von der manuellen Zugüberwachung wird die Entwicklung bis zu den Betriebszentralen aufgeführt. Anschließend werden Ansätze zur automatischen Disposition erläutert und bewertet. Danach wird das Konzept des neuen Dispositionsverfahrens sowie die Entwicklung der notwendigen Algorithmen dargestellt. Abschließend erfolgt eine Beschreibung der Implementierung des entwickelten Dispositionsverfahrens.

2 Grundlagen der Disposition

Beim Eisenbahnbetrieb gelten Sicherheit, Pünktlichkeit, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit als oberste Grundsätze [68]. Diese Grundsätze müssen jedoch schon bei der Produktionsplanung und nicht erst bei der Betriebsdurchführung berücksichtigt werden. Die Produktionsplanung ist bei den öffentlichen Verkehrsmitteln die Fahrplankonstruktion. Die Eisenbahnverkehrsunternehmen (z. B. DB Reise & Touristik, DB Regio, DB Cargo, …) führen eine Angebotsplanung nach wirtschaftlichen Kriterien aufgrund der Kundenwünsche durch. Nachdem die verschiedenen Eisenbahnverkehrsunternehmen ihre Planungen abgeschlossen haben, geben sie ihre Trassenbestellungen an die DB Netz AG, die als Infrastrukturbetreiber die Trassenwünsche der Eisenbahnverkehrsunternehmen koordinieren muß. Die exakte Fahrplankonstruktion, sowie die spätere Betriebsdurchführung liegt in den Händen der DB Netz AG.

2.1 Fahrplankonstruktion

Der Eisenbahnbetrieb wird nach einem festgelegten Fahrplan abgewickelt. Der sogenannte Jahresfahrplan entsteht in einer längeren Planungsphase. Für die Konstruktion der Fahrpläne ist nach der Bahnreform die DB Netz AG verantwortlich. Sie ist der Infrastrukturbetreiber und nicht nur für die Konstruktion der Fahrpläne sondern auch für die Umsetzung der Fahrpläne im Betrieb zuständig. Sowohl DB-Konzerninterne (z. B. DB Reise & Touristik, DB Regio, DB Cargo) als auch externe Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) bestellen Trassen bei der DB Netz AG. Aus diesen Trassenwünschen konstruiert die DB Netz AG einen konfliktfreien Fahrplan. Dieser Fahrplan ist dann die Grundlage für die Durchführung des Betriebsablaufs.

Der Fahrplan besitzt bei der Eisenbahn einen hohen Stellenwert. Die Verkehrsunternehmen müssen ihre Produktion im voraus planen, da zum einen der Fahrplan als Angebot an ihre Kunden veröffentlicht werden muß und zum anderen die Pünktlichkeit und ein reibungsloser Betriebsablauf entscheidend von der Genauigkeit des konstruierten Fahrplans abhängen. Die angestrebte Pünktlichkeit der Züge im Betriebsablauf setzt hierbei einen konfliktfreien Fahrplan voraus. Alle Konflikte und Behinderungen der Züge führen im Betriebsgeschehen zu Abweichungen vom zugrunde liegenden Fahrplan und somit zu Verspätungen.

Hieraus ergibt sich folgende These [15]: Für die Konstruktion von Fahrplänen für die Eisenbahn müssen Konflikte, also gegenseitige Behinderungen der Züge, exakt er-

mittelt und ausgeschlossen werden. Als Voraussetzung hierfür müssen die benutzte Infrastruktur hinsichtlich Topologie und Betriebsbedingungen exakt modelliert und das Betriebsprogramm darauf genau abgebildet und berechnet werden.

2.1.1 Manuelle Fahrplankonstruktion

Über 150 Jahre wurde der Fahrplan von den Fahrplanbearbeitern mit Bleistift und Lineal auf Papier konstruiert. Die Fahrplanbearbeiter zeichneten in den Bildfahrplanblättern die Zeit-Weg-Linien der Züge ein. Dabei werden die Fahrzeiten der Züge zwischen den einzelnen Betriebsstellen aus Tabellen entnommen, in denen die Fahrzeiten einiger Standardzüge enthalten sind.

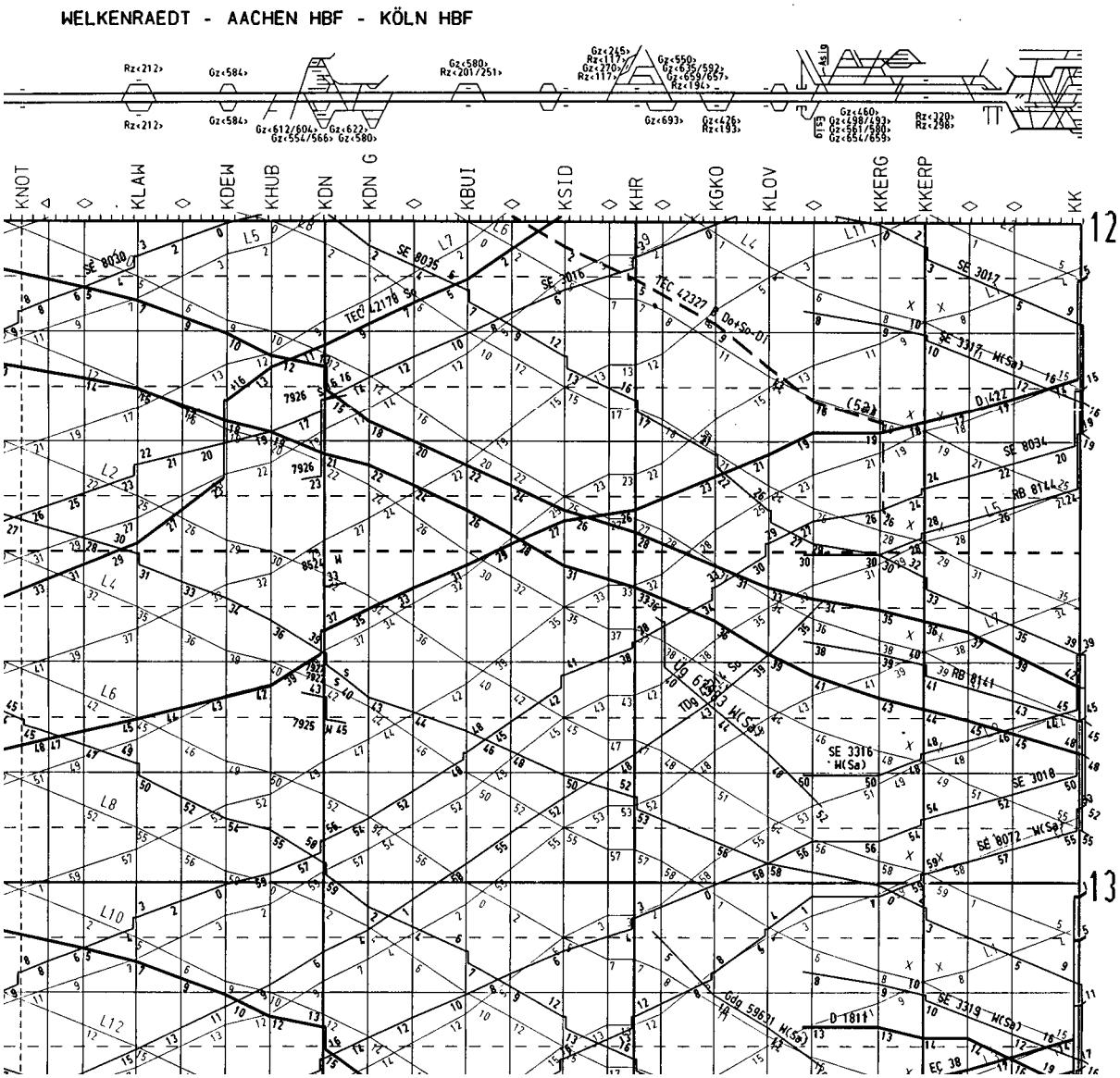

Abb. 1: Bildfahrplanblatt

Im Fahrplanblatt (siehe Abb. 1) sind die Zeit-Weg-Linien ohne die Belegungszeiten, die sich aus der Sicherungstechnik ergeben, dargestellt. Theoretisch könnte man die Belegungszeiten auch bei der manuellen Fahrplankonstruktion ermitteln, jedoch ist der sehr hohe Zeitaufwand ohne Rechnerunterstützung nicht vertretbar. Die Sperrzeiten werden bei der manuellen Fahrplankonstruktion durch pauschale Zuschläge berücksichtigt. Im Bildfahrplanblatt lassen sich die Konflikte zwischen den Zügen nur ungenau bestimmen. Die Konfliktfreiheit des konstruierten Fahrplans ist sehr stark an die Fähigkeiten des Bearbeiters geknüpft.

Die Konstruktion des Fahrplans im Bildfahrplanblatt ist streckenorientiert. In den Bahnhöfen mit mehreren Gleisen wird zusätzlich die Bahnhofsfahrordnung (BFO) zur Darstellung des geplanten Betriebsablaufs verwendet. In der BFO (siehe Abb. 2) werden die Belegungen der einzelnen Gleise bildlich wiedergegeben, so daß die zeitliche Belegung durch die einzelnen Zugfahrten erkennbar ist.

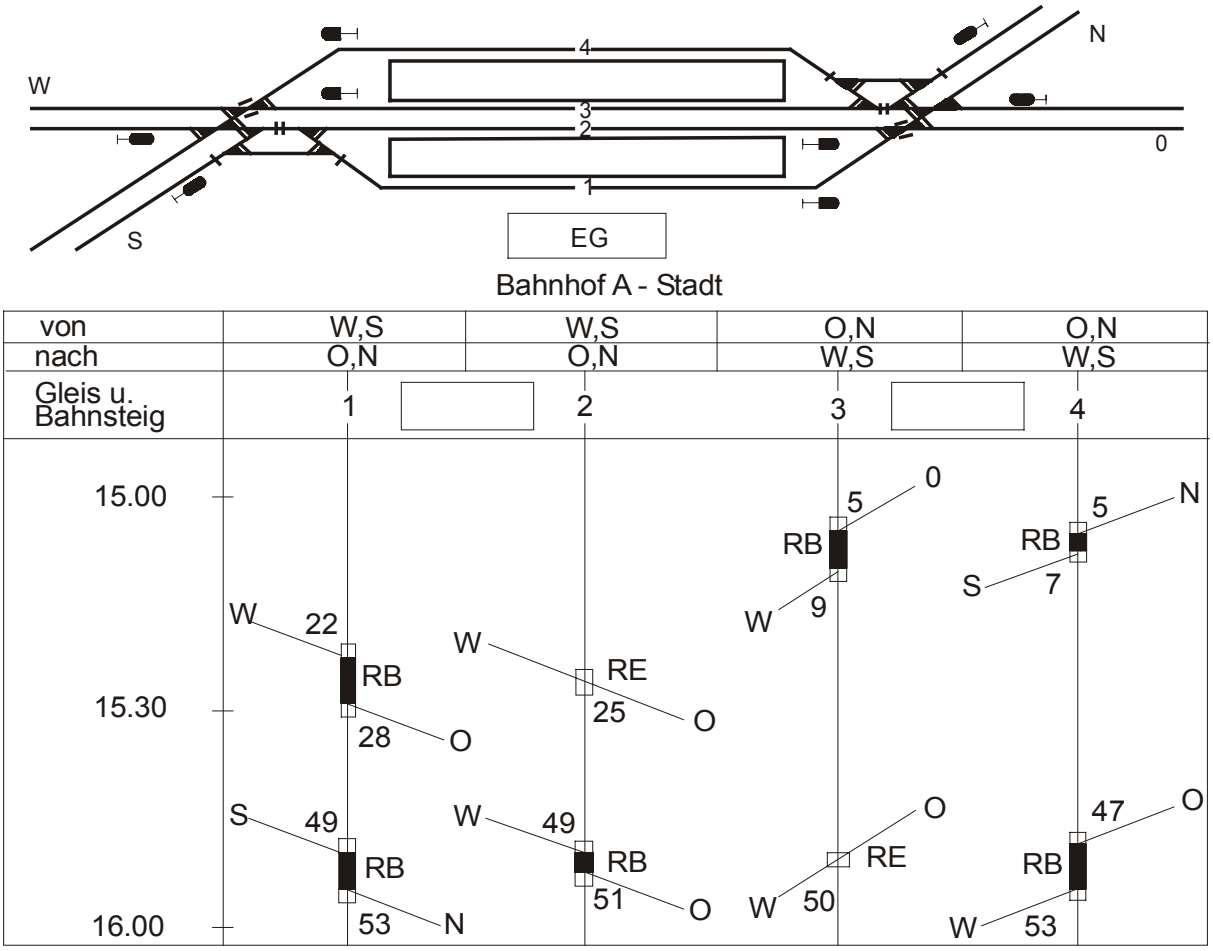

Abb. 2: Bahnhofsfahrordnung (aus [103])

Die Gleisbelegungszeit setzt sich aus der jeweiligen Haltezeit der Züge und den Ein- und Ausfahrsperrzeiten zusammen. Die Berücksichtigung der Ein- und Ausfahrsperr-

zeiten reicht für die Konfliktfreiheit der einzelnen Gleisbelegungen zwar aus, allerdings können hierbei keine Fahrstraßenausschlüsse im Bahnhof ermittelt werden. Eine Ergänzung der Bahnhofsfahrordnung durch alle Fahrstraßenausschlüsse hat sich wegen der äußerst komplexen und unübersichtlichen Darstellung als Fahrplanunterlage nicht durchsetzten können [77]. Auch hier sind die betrieblichen Erfahrungen des Fahrplanbearbeiters entscheidend für die Konfliktfreiheit des Fahrplans.

Mit dieser bisherigen manuellen Fahrplankonstruktion läßt sich die oben aufgestellte These jedoch nicht erfüllen. Daher wurde zu Beginn der 90er Jahre eine Rechnerunterstützung für die Fahrplanfeinkonstruktion konzipiert.

2.1.2 Rechnerunterstützte Fahrplankonstruktion

Zunächst war die Rechnerunterstützung bei der Fahrplankonstruktion auf die Fahrzeitrechung beschränkt. Aufgrund der Triebfahrzeug- und Zugparameter sowie der Infrastruktur wurde die Fahrzeit der Züge zwischen den Betriebsstellen berechnet und stand dann für die manuelle Fahrplankonstruktion zur Verfügung. Das Programmsystem IFB (Interaktive Fahrplan Bearbeitung [8], [67]) der damaligen Deutschen Bundesbahn automatisierte lediglich die Zeichnung der Bildfahrplanblätter. Die Fahrpläne wurden nach wie vor manuell konstruiert und die Fahrplandaten (Zugnummern, Ankunfts-, Abfahrts- und Durchfahrtszeiten) in das System IFB eingegeben. IFB sorgte dann für den Ausdruck der Bildfahrpläne, so daß diese nicht mehr aufwendig im Steindruckverfahren gedruckt werden mußten. Diese Vervielfältigung ist notwendig, da jede betriebsführende Stelle mit den aktuellen Fahrplanblättern ausgestattet werden muß. Die eigentliche Konstruktion der Fahrpläne wurde aber durch dieses System noch nicht unterstützt.

Auch bei anderen Bahnen wurden in den 80er Jahren ähnliche Projekte gestartet. Bei der Deutschen Reichsbahn entstand das Programmsystem TEFA (Technologen-Arbeitsplatz Fahrplan [84]). Dieses System erstellt nach Erfassung der Fahrplandaten die Buch- und Bildfahrpläne. Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) entwikkelten SYFA (System Fahrplan) und die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) das System RUF (Rechnerunterstützte Fahrplanerstellung). Auch diese beiden Verfahren dienen nur dazu, die Fahrplanunterlagen zu erstellen, aber bieten keine Rechnerunterstützung für den eigentlichen Fahrplankonstruktionsprozeß.

Erst zu Beginn der 90er Jahre wurde ein rechnerunterstütztes Verfahren zur Fahrplankonstruktion entwickelt, welches ab 1994 in einer Pilotanwendung bei der Deutschen Bahn eingesetzt wurde. Dieses System FAKTUS (Fahrplankonstruktion und -untersuchung [12]) wurde am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH

Aachen entwickelt. Nach der erfolgreichen Pilotanwendung wurde FAKTUS erstmals für die Erstellung des Jahresfahrplans 1998/99 eingesetzt.

Die folgenden Punkte, die bei einer Rechnerunterstützung für die Fahrplankonstruktion von zentraler Bedeutung sind, wurden bei der Konzeption von FAKTUS berücksichtigt [15]:

- Integration aller für die Konstruktion relevanten Berechnungen, insbesondere der zugspezifischen Fahrzeiten
- Sofortige Ermittlung von Belegungskonflikten im Fahrplan
- Visualisierung aller Belegungen, Konflikte und freien Zeitlücken
- Berechnung von Qualitätskenngrößen des konstruierten Fahrplans

Mit FAKTUS ist es möglich, Fahrpläne interaktiv am Bildschirm zu konstruieren. Die für die Fahrzeitrechnung benötigte Infrastruktur wird durch ein Graph-Modell abgebildet. Dieser sogenannte SPURPLAN-Graph [12] ist ein gerichteter knotenbewerteter Digraph. Die Infrastrukturdaten werden in den Knoten des Graphen gespeichert. Die gerichteten Kanten, die selbst keine Informationen beinhalten, verbinden die Knoten. Dieser SPURPLAN-Graph enthält die notwendigen Elemente der Gleistopologie (Gleise, Weichen, …) sowie alle zur Fahrzeit- und Belegungsrechnung notwendigen Infrastrukturelemente (Hauptsignale, Vorsignale, Zugschlußstellen, Geschwindigkeiten, Neigungswechsel, …). Die Elemente werden in diesem Graph-Modell redundanzfrei gespeichert und sind mit Hilfe einer graphischen Oberfläche des Programms SPURPLAN benutzerfreundlich zu erfassen und zu ändern. Die Fahrwege in den Betriebsstellen werden als eine Abfolge von Infrastrukturelementen definiert.

Die Laufwege der Züge werden dann in FAKTUS als eine Folge von „Betriebsstellenfahrwegen“ festgelegt. Neben den Laufwegen der Züge werden auch deren Zugcharakteristika (Lokbaureihe, Länge, Masse, zulässige Geschwindigkeit und andere) eingegeben. Mit Hilfe der hinterlegten Geschwindigkeits-Zugkraft-Diagramme für die einzelnen Lokbaureihen kann dann eine exakte Fahrzeitrechnung nach dem Δv-Schritt-Verfahren erfolgen.

Im Eisenbahnwesen existieren mehrere mögliche Abstandshaltungsverfahren. Ein „Fahren auf Sicht“ ist aufgrund der langen Bremswege nicht realisierbar und ein „Fahren im Zeitabstand“ wegen zu hoher Zugdichte nicht durchführbar. In Deutschland wird das „Fahren im Raumabstand“ angewendet. Dieses Verfahren wird auch in der Eisenbahnbau und -betriebsordnung [17], nach der alle überregionalen Eisenbahnstrecken betrieben werden müssen, und in der DB-Konzernrichtlinie „Züge fah-

ren und rangieren“ [24] vorgeschrieben. Hierbei ist die Strecke durch Signale in Blockabschnitte unterteilt. In jedem dieser Abschnitte darf sich nur ein Zug befinden, d. h. dieser Abschnitt (Sperrstrecke) ist für eine gewisse Zeit (Sperrzeit) für alle übrigen Zugfahrten gesperrt. Graphisch ergeben sich dadurch Sperrzeitenkästchen. Eine Abfolge dieser Sperrzeitenkästchen wird Sperrzeitentreppe genannt. Neben der Fahrzeitrechnung findet auch eine Belegungsrechnung statt, bei der die Sperrzeitentreppen berechnet werden. In der graphischen Darstellung ist daher nicht nur die Zeit-Weg-Linie der Züge sondern auch die zugehörige Sperrzeitentreppe zu erkennen. Konflikte zwischen den einzelnen Zügen ergeben sich dann als Überschneidung der Belegungszeiten.

HAPPEL hat diese Sperrzeitentreppe als Grundlage für die Fahrplankonstruktion bereits 1959 vorgeschlagen [37]. Eingesetzt wurde die Sperrzeitentreppe aufgrund des hohen Aufwands bei der manuellen Fahrplankonstruktion jedoch nicht. Erst mit der Rechnerunterstützung war es möglich, die Sperrzeitentreppen für die Züge zu ermitteln. Die Sperrzeitentreppe ist nicht nur für das konventionelle Haupt-Vorsignalsystem einsetzbar, sondern sie kann auch für moderne Signalsysteme weiterentwikkelt werden [102].

Die Darstellung bei FAKTUS (siehe Abb. 3) ist dem Fahrplanblatt der manuellen Fahrplankonstruktion nachempfunden. Die Bahnhofsfahrordnung ist (wenn auch nicht getrennt darstellbar) intern enthalten, so daß Konflikte bei der Gleisbelegung angezeigt werden. Erstmals können auch die Fahrstraßenausschlüsse bei der Fahrplankonstruktion exakt berücksichtigt und vom Bearbeiter erkannt und gelöst werden.

Mit dem Verfahren FAKTUS zur Konstruktion von Fahrplänen am Rechner wurde ein bisher noch nicht erreichter Grad an Exaktheit der Konflikterkennung und Abschätzung der Folgen von Fahrplanstrukturen durch die Berechnung der Pufferzeiten sowie der Auswertung weiterer Kenngrößen des Fahrplans (z. B. Beförderungszeitquotient) erreicht [14]. FAKTUS war die Grundlage für die Entwicklung von RUT (Rechnerunterstütztes Trassenmanagement [85]). Dieses von der Transport-, Informatik- und Logistik-Consulting GmbH (seit 2002 als DB Systems GmbH im Konzern der Deutschen Bahn AG) zur Anwendungsreife entwickelte Programm wird bei der DB Netz AG flächendeckend zur Konstruktion der Fahrpläne seit dem Jahresfahrplan 1998/99 eingesetzt [3].

Erst der Einsatz der Rechnerunterstützung gewährleistet einen „wahren“ Fahrplan. Denn durch die graphische Darstellung der Sperrzeitentreppen aller Züge können die Konflikte zwischen den Zugfahrten exakt ermittelt und die Konfliktfreiheit der Fahrpläne sichergestellt werden. Die Sicherheit des Betriebes wird in erster Linie durch

die Sicherungstechnik und nicht durch den Fahrplan gewährleistet. Dennoch wären möglicherweise sogar einige Eisenbahnunfälle (insbesondere auf eingleisigen Strecken) nicht passiert, wenn der zugrunde liegende Fahrplan konfliktfrei gewesen wäre [15].

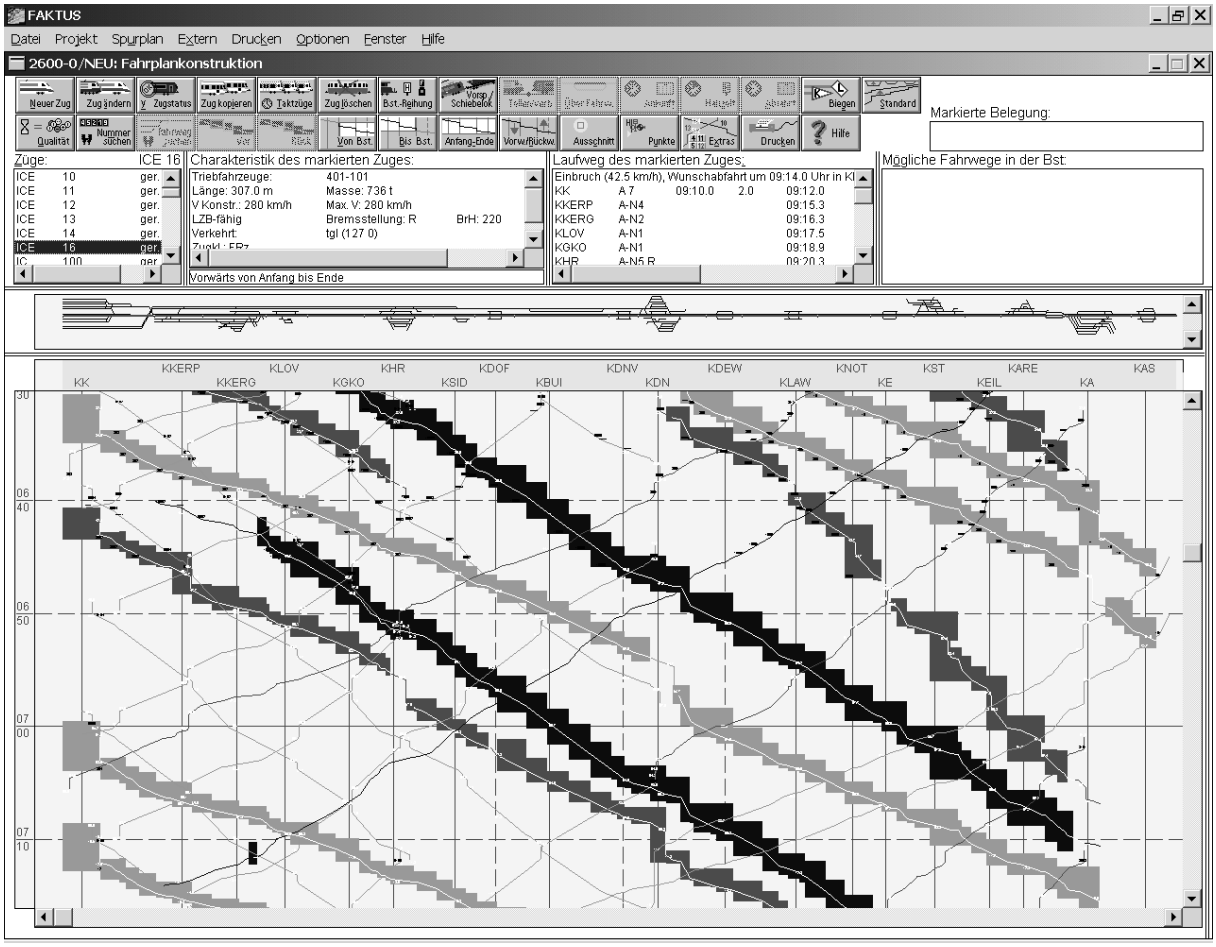

Abb. 3: Rechnerunterstützte Fahrplankonstruktion mit FAKTUS

Für die Betriebsabwicklung ist es von entscheidender Bedeutung, daß der Fahrplan konfliktfrei ist. Konflikte im Fahrplan führen zu Konflikten in der Betriebsdurchführung, bei der sie zwangsweise gelöst werden müssen. Die Qualitätssicherung sollte allerdings so früh wie möglich geschehen, also im günstigsten Fall direkt bei der Fahrplanerstellung. Nur ein konfliktfreier, „wahrer“, qualitativ guter Fahrplan, der alle Randbedingungen der Eisenbahn beachtet, kann als gute Grundlage für die Betriebsabwicklung und die Disposition dienen.

2.2 Überwachung des Betriebsgeschehens

Würden alle Züge pünktlich verkehren und gäbe es keinerlei Störungen im Betriebsablauf, dann könnte der zuvor konstruierte konfliktfreie Fahrplan ohne Behinderun-

gen im Betriebsgeschehen umgesetzt werden. Die Unregelmäßigkeiten, denen die Betriebsabwicklung unterworfen ist, führen zu Abweichungen vom Fahrplan, sie beeinträchtigen die Betriebsqualität, gefährden die von den Eisenbahnverkehrsunternehmen eingekaufte Leistungsqualität und senken die Wirtschaftlichkeit [25].

Zur Minimierung der Folgeverspätungen kann beispielsweise die Zugreihenfolge im Betriebsablauf geändert werden. Solche dispositiven Maßnahmen wurden früher üblicherweise von den örtlichen Fahrdienstleitern übernommen. Da diese jedoch nur den direkten Bereich ihres Stellwerks überblicken können, besitzen sie auch nur eine beschränkte Sicht auf das gesamte Betriebsgeschehen. Daher wurden zur Überwachung und Steuerung des Betriebsablaufs schon frühzeitig Betriebsleitstellen eingerichtet, um den Betriebsablauf von zentralen Stellen positiv zu beeinflussen. Diese Zugleitungen und Oberzugleitungen erfüllten netzbezogene Dispositions- und Steuerungsaufgaben mit dem Ziel, marktgerechte Qualitätsstandards einzuhalten. Die aktuellen Betriebszentralen haben diese Aufgaben übernommen und arbeiten eng mit den Transporteuren zusammen [25].

Die Betriebsleitstellen haben die folgenden Aufgaben [27]:

- Die Hauptaufgabe ist die planmäßige Abwicklung des Betriebsgeschehens. Dabei sollen auftretende Verspätungen durch geeignete Dispositionsmaßnahmen minimiert werden, so daß möglichst schnell der Fahrplanmäßige Zustand wieder erreicht wird. Dabei treten bei schwierigen Betriebsverhältnissen Maßnahmen zur flüssigen Betriebsabwicklung auf Strecken und in Bahnhöfen in den Vordergrund.
- Eine weitere Aufgabe ist die Überwachung und die Steuerung des Betriebsablaufs unter Berücksichtigung der Betriebsqualität.
- Des weiteren sind alle Beteiligten zu wirtschaftlichem Handeln verpflichtet. Lediglich bei Maßnahmen zur raschen Beseitigung von Betriebsstörungen darf die Wirtschaftlichkeit in den Hintergrund treten.

Eine zentrale Bedeutung zur Wahrnehmung von dispositiven Eingriffen hat hierbei die Zugüberwachung. Sie ist für die Disposition des Betriebsablaufs auf den einzelnen Strecken und Bahnhöfen zuständig. Falls im Betriebsablauf keine Störungen auftreten, haben die Disponenten nur eine überwachende Funktion. Im Störungsfall entscheiden sie über die Zugfolgeregelung in ihrem Bereich, verlegen Überholungshalte von Zügen und bestimmen, welcher Zug wo überholt wird. Dazu müssen sie die Standorte der einzelnen Züge möglichst genau kennen. Die Zuglaufverfolgung geschah früher fernmündlich zwischen Fahrdienstleitern und Disponent, wurde aber im Laufe der Jahre automatisiert. Aufgrund dieses Abbildes des Betriebsablaufs treffen

die Disponenten ihre Dispositionsentscheidungen, die sie dann als Weisungen an die örtlichen Fahrdienstleiter auf den Stellwerken weitergeben. Die Fahrdienstleiter sind für die Umsetzung in den aktuellen Betriebsablauf verantwortlich und steuern den Betrieb. Anhand der Zuglaufverfolgung kann der Disponent dann erkennen, ob der Betriebsablauf sich so verhält, wie er ihn prognostiziert hat. Es ergibt sich daher ein Regelkreis (siehe Abb. 4).

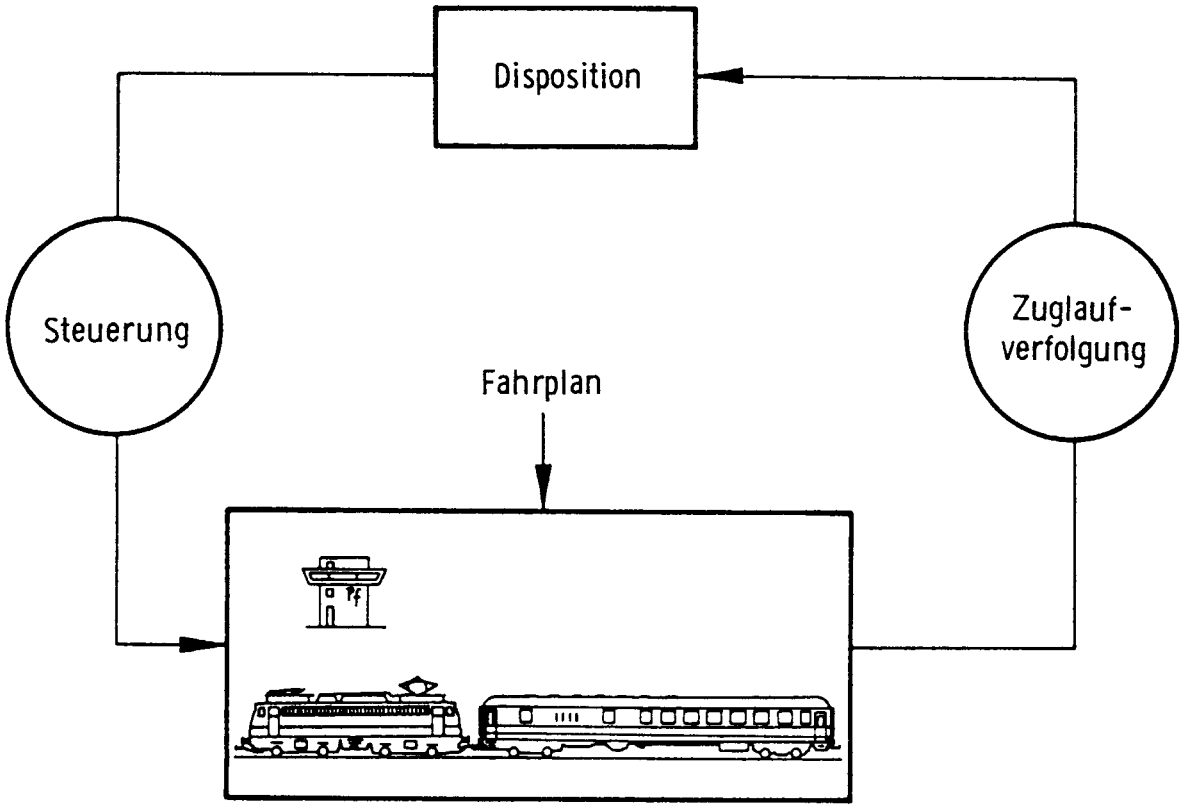

Abb. 4: Regelkreis der Zugüberwachung (aus [61])

Bei der Disposition wird versucht, die negativen Auswirkungen eines verspäteten Zuges auf andere Züge so gering wie möglich zu halten und das Entstehen von Folgekonflikten auszuschließen oder wenigstens zu minimieren. Dispositionsentscheidungen sind nötig, damit der geplante Zustand möglichst schnell wieder erreicht wird. Der tägliche Zugbetrieb beruht zwar auf einem erstellten und ursprünglich konfliktfreien Fahrplan, ist jedoch Einflüssen unterworfen, die entweder isoliert ohne die Mitwirkung anderer Züge als Urverspätungen oder durch Verschulden anderer Züge als Folgeverspätungen auftreten können [12]. Die Urverspätungen entstehen aufgrund äußerer Einflüsse wie z. B. Signalstörung, Schienenbruch, starker Reisendenandrang oder Triebfahrzeugausfall. Die Folgeverspätungen entstehen durch die gegenseitige Behinderung von Zügen. Erhält beispielsweise ein Zug eine Urverspätung, und überträgt sich diese dann auf einen zweiten Zug, so verursacht die Urverspätung

eine Folgeverspätung des zweiten Zuges. Entstehen die Fahrplanabweichungen der Züge durch Ur- oder Folgeverspätungen außerhalb des betrachteten Bereichs, resultieren hieraus Einbruchsverspätungen, mit denen die Züge in den Untersuchungsraum einbrechen.

Die Verspätungsübertragung wird durch die Pufferzeiten gedämpft. Die Pufferzeiten, bei der Fahrplankonstruktion als nicht nutzbare Zeitlücken vorhanden oder gezielt zwischen den Sperrzeitentreppen eingeplant, werden zu Zeitreserven bei der Betriebsabwicklung. Damit ein nachfolgender Zug nicht bereits bei sehr kleinen Erregerverspätungen eine Folgeverspätung erleidet, werden zwischen den Sperrzeitentreppen der einzelnen Züge die vorgegebenen Pufferzeiten eingebaut. Erst wenn die Urverspätung eines ersten Zuges größer ist als die Pufferzeit, tritt eine Folgeverspätung des zweiten Zuges ein. Da von dieser dämpfenden Eigenschaft der Pufferzeit auf die Folgeverspätungen im Betriebsablauf Gebrauch gemacht wird, kommt der Bemessung der Pufferzeit bei der Fahrplankonstruktion eine besondere Bedeutung zu. Erst seit Einführung der rechnerunterstützten Fahrplanerstellung mit FAKTUS können die Pufferzeiten exakt ermittelt werden. Jedoch kommen auch hier nur pauschale Werte für die Pufferzeiten zur Anwendung. Mit Hilfe von FAKTUS könnten jedoch auch je nach Zugfolgefall unterschiedliche Pufferzeiten benutzt werden, die aufgrund der zu erwartenden Verspätung der betroffenen Züge zu ermitteln sind. Da in der Regel schon statistische Aussagen über das Pünktlichkeitsniveau vorliegen, können die Folgeverspätungen ersten Grades bereits bei der Fahrplankonstruktion berechnet und dann dementsprechend die Größe der Pufferzeiten festlegt werden.

Aufgrund weiterer zu erwartender und zufälliger Einflüsse auf den Betriebsablauf kann nur für einen begrenzten Dispositionszeitraum mit ausreichender Sicherheit disponiert werden. Dadurch wird der Entscheidungsspielraum eingeschränkt. Die Optimierungsprobleme sind in der Regel nicht so komplex wie in der Fahrplangestaltung, da alle Randbedingungen wie Anschlußbindungen oder Umlaufzusammenhänge in der Kürze der Zeit für die zu treffende Entscheidung nicht bedacht werden können. Daher konzentriert sich die Disposition, trotz der zahlreichen Einflüsse und eventuellen Folgekonflikte, auf einen kleinen Zeithorizont und die wichtigsten Zusammenhänge, z. B. die Anschlüsse im nächsten wichtigen Bahnhof.

2.2.1 Zeitliche Entwicklung der Betriebsleitstellen

Erstmalig wurden übergeordnete Betriebsleitstellen aufgrund von schwierigen Betriebsverhältnissen in Winter 1912/13 im Rhein-Ruhr-Gebiet aufgebaut. Nachdem diese versuchsweise eingerichteten Zugleitungen schon im Frühjahr 1913 wieder

aufgegeben wurden, richtete die Deutsche Reichsbahn Ende der 20er Jahre jedoch Zugleitungen und Zugüberwachungen für stark belastete Strecken wieder ein. Hieraus entwickelte sich das Betriebleitstellenkonzept der Deutschen Bundesbahn, welches hierarchisch aufgebaut war. An den einzelnen Direktionsstandorten wurden Oberzugleitungen eingerichtet, denen die Zugleitungen unterstellt waren, die ihrerseits wiederum seit 1928 zum Teil über besondere Zugüberwachungen verfügten. Ab 1959 wurden die Zugleitungen und Zugüberwachungen an den Sitz der Oberzugleitungen konzentriert. Im Jahre 1971 wurde die Zentrale Transportleitung (ZTL) in Mainz als übergeordnete Betriebsleitstelle eingerichtet, die gegenüber den Oberzugleitungen weisungsbefugt war [97]. Hauptaufgabe der Zentralen Transportleitung war die netzbezogene Disposition für die Züge des Schienenpersonenfernverkehrs (IC-Verkehr, …) und des hochrangigen Güterfernverkehrs (ICG-Verkehr, …).

Nach der Einführung des Betriebszentralenkonzepts der DB Netz AG wurde der Betriebsleitstellendienst neu strukturiert. Die in den ehemaligen Direktionsstandorten ansässigen Zugleitungen und Zugüberwachungen wurden in die neu aufgebauten Betriebszentralen (BZ, siehe Abschnitt 3.4) integriert. Insgesamt sieben BZ sind für die Betriebsabwicklung auf dem Netz der Deutschen Bahn verantwortlich. Als übergeordnete Betriebsleitstelle wurde die Netzleitzentrale (NLZ, siehe Abschnitt 3.5) in Frankfurt eingerichtet, die analog zur ehemaligen ZTL in Mainz die überregionalen Reise- und Güterzüge netzweit disponiert und gegenüber den BZ weisungsbefugt ist.

In den Betriebszentralen sind außerdem die Transportleitungen der drei DB-internen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) als Kunden der DB Netz AG vertreten. Im einzelnen sind dies die Transportleitung von DB Reise & Touristik (TP F), die Transportleitung von DB Regio (TP R) und die CargoLeitStelle von DB Cargo (CLS). So können im Konfliktfall die Entscheidungen direkt zwischen den betroffenen Eisenbahnverkehrsunternehmen und der DB Netz AG als Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) koordiniert werden. Endgültig entscheiden jedoch die Betriebsleitstellen der DB Netz AG (BZ und NLZ) über den Betriebsablauf.

2.3 Grundlegende Dispositionsregeln

In diesem Abschnitt soll auf allgemeine Dispositionsregeln eingegangen werden, nach denen die Fahrdienstleiter und die übergeordneten Betriebsleitstellen die Züge disponieren. Des weiteren werden einzelne dispositive Maßnahmen vorgestellt.

2.3.1 Vorrangregelungen

In den Vorschriften der DB sind nur wenige grundlegende Regeln zu finden. Ursprünglich waren in der Fahrdienstvorschrift der Deutschen Bundesbahn (DS 408, [26]) einige Regelungen über die Rangordnung von Zügen zu finden. Nach der Neuordnung des Regelwerks der Deutschen Bahn AG sind diese Regelungen aus der Fahrdienstvorschrift („Züge fahren und Rangieren“, DS/DV 408, [24]) in die Richtlinie R 420 (Betriebszentralen der DB Netz AG, [25]) übernommen worden.

Im einzelnen gelten die folgenden Vorrangregelungen (hier aus [25], Modul 0105, vormals [26], §23, Abs. 16):

a) Dringliche Hilfszüge haben Vorrang vor allen anderen Zügen.

b) S-Bahnzüge auf S-Bahngleisen haben Vorrang vor allen anderen Zügen.

c) In den übrigen Fällen haben die schnelleren Züge Vorrang vor den langsameren.

d) Vom Grundsatz nach c) darf abgewichen werden:

- Geringfügig, wenn dies der flüssigen Betriebsabwicklung insgesamt dienlich ist. Dabei ist den durchfahrenden Zügen vor den haltenden und den einfahrenden vor den ausfahrenden Zügen Vorrang zu gewähren.
- Zur Sicherstellung von Anschlüssen im Reiseverkehr, wenn der schneller fahrende Zug nicht mehr als 5 Minuten (absolut) verspätet wird.

Insgesamt ist festzustellen, daß diese Handlungsanweisungen nur für spezielle Ausnahmefälle eine konkrete Aussage treffen; für die überwiegende Anzahl von Konflikten helfen sie dem Disponenten jedoch nicht weiter.

2.3.2 Wartezeitregelungen

Im Eisenbahnverkehr können nicht alle möglichen Relationen durch Direktverbindungen realisiert werden. So dienen Nahverkehrszüge als Zubringer oder Abbringer für die Fernverkehrszüge. Aber auch im Fernverkehr existieren in bestimmten Knotenbahnhöfen Korrespondenzhalte der Fernreisezüge untereinander. Beispielsweise in Köln Hbf und Mannheim Hbf stehen die korrespondierenden Fernzüge am selben Bahnsteig, um ein Umsteigen der Reisenden komfortabel ohne Bahnsteigwechsel zu ermöglichen. Da diese Anschlüsse ein Teil des Fahrplanangebots sind, an dem sich die Kunden orientieren, sind die Anschlußbindungen nach Möglichkeit auch im Verspätungsfall zu gewährleisten.

Das Abwarten von verspäteten Anschlußzügen im Reisezugverkehr hat zur Folge, daß die Verspätung eines Zuges sich gegebenenfalls durch das ganze Netz fortpflanzt. Insbesondere wenn ein Fernverkehrszug eine Verspätung erhält, die er bis zum nächsten Knoten nicht mehr einfahren kann, pflanzt sich die Verspätung im schlimmsten Fall nach dem Schneeballprinzip fort. Um dies zu verhindern, wurde die Wartezeitvorschrift aufgestellt. Die Wartezeitvorschrift ist heute als Wartezeitregelung in der R 420 [25] enthalten. In ihr wird geregelt, wie lange ein Zug auf einen verspäteten Anschlußzug maximal warten darf. Im einzelnen gelten die in Tab. 1 eingetragenen Werte. So wartet beispielsweise ein IC maximal fünf Minuten auf einen anderen verspäteten IC. S-Bahn-Züge warten generell nicht auf verspätete Züge, da bei den in Ballungsgebieten verkehrenden S-Bahn-Zügen davon ausgegangen wird, daß die Taktzeit innerhalb des S-Bahn-Systems entsprechend kurz ist und die Anschlußreisenden nicht unverhältnismäßig lange auf die nächste Verbindung warten müssen.

es warten	auf			
[in Minuten]	EC, ICE, IC, IR, Thalys, CIS, IRE/-D	EN, ICN, D, CNL	S	übrige Züge
EC, ICE, IC, IR, Thalys, CIS, IRE/-D	5	0	0	0
EN, ICN, D, CNL	10	10 bzw. 30 bei Kurswagenübergang	0	5
S	keine WZ	keine WZ	keine WZ	keine WZ
übrige Züge	5	5	0	5

Tab. 1: Regelwartezeit

Die Regelwartezeiten gemäß Tab. 1 gelten nicht, wenn innerhalb von 30 Minuten eine annähernd gleichwertige Verbindung besteht. Zusätzlich zu diesen Regelwartezeiten ist die Mindestübergangszeit zu berücksichtigen. Sie beträgt zwischen 2 und 5 Minuten, je nachdem, ob der Anschlußzug am gleichen Bahnsteig gegenüber steht oder ein Bahnsteigwechsel erforderlich ist.

Die Betriebszentrale kann im Einzelfall Ausnahmen von der Regelwartezeit festlegen (bei Fernreisezügen in Abstimmung mit der Netzleitzentrale). Dies ist beispielsweise in Tagesrandlagen erforderlich, wenn dies die letzte Verbindung betrifft.

Damit die Disponenten in der Betriebszentrale die Anschlußproblematik sinnvoll beurteilen können, ist es erforderlich, über den Besetzungsgrad der Züge und die Zahl der Anschlußreisenden informiert zu sein. Da diese Informationen jedoch auf elektronischem Wege nicht zur Verfügung gestellt werden können, sind die Disponenten auf die Vormeldungen der Zugführer bzw. Zugbegleiter aus den einzelnen Zügen oder des örtlichen Personals angewiesen. Die Zugführer müssen bei einer Verspätung ihres Zuges feststellen, ob Anschlüsse gefährdet sind. Aufgrund ihrer Fahrkartenkontrolle kennen sie auch die Anzahl und Reiseziele der Anschlußreisenden. Dann melden die Zugführer diese Angaben per Zugfunk oder Mobiltelefon an die Betriebszentrale. Falls keine Vormeldungen vorliegen, gehen die Disponenten in der Betriebszentrale davon aus, daß sich keine Anschlußreisenden im Zug befinden.

Die Disponenten entscheiden dann aufgrund der Vormeldungen, welche Anschlußzüge den verspäteten Zug abwarten und welche nicht. Alternativ können sie auch veranlassen, daß der verspätete Zug einen zusätzlichen Verkehrshalt erhält, um die Anschlußreisenden direkt an ihr Ziel zu bringen, wenn die Laufwege beider Züge gleich sind.

2.3.3 Umlaufproblematik

Neben den bisher aufgeführten Gegebenheiten muß der Disponent auch die Umlaufproblematik beachten. Für die betrieblichen Abläufe sind von den Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) sogenannte Umläufe erstellt worden, die einerseits die Triebfahrzeuge und das Wagenmaterial, andererseits das Personal berücksichtigen. Die EVU sind aus wirtschaftlichen Gründen bemüht, die Umläufe so zu planen, daß sich das Zugmaterial und das Personal nur so kurz wie nötig in den Endbahnhöfen der Linie befinden. Denn die Züge können nur Gewinn erwirtschaften, wenn sie Reisende befördern. Somit versuchen die EVU durch eine geschickte Umlaufplanung die Todzeiten in den Endbahnhöfen zu minimieren und so zu dimensionieren, wie sie für den planmäßigen Betriebsablauf notwendig sind.

Aufgrund der kurzen Wendezeiten kann es häufiger passieren, daß ein Zug schon im Startbahnhof eine Anfangsverspätung erhält. Dies resultiert aus der Verspätung eines ankommenden Zuges, die durch die Wendezeit nicht aufgefangen werden kann. Dadurch kann es vorkommen, daß auch auf zweigleisigen Strecken Züge einer Richtung Folgeverspätungen auf Züge der Gegenrichtung übertragen.

Da in den Knotenbahnhöfen Kapazitätsengpässe auftreten, enden und beginnen viele Nahverkehrslinien nicht im Kontenbahnhof, sondern werden durchgebunden, d. h. beginnende und endende Linien werden miteinander verknüpft. Die dadurch entstehenden relativ langen Nahverkehrslinien haben den Nachteil, daß sie häufig verspätungsanfällig sind. Aufgrund des langen Laufwegs werden diese dann gegebenenfalls auf ganze Netzteile übertragen.

In Konfliktfällen müssen unter Umständen auch die Fahrzeug- und Personalumlaufpläne kurzfristig geändert werden. In einigen wichtigen Knotenbahnhöfen gibt es auch Fahrzeug- oder Personalreserven vor Ort, die verwendet werden können. Da dies jedoch in die Aufgabenbereiche der betroffenen Eisenbahnverkehrsunternehmen fällt, muß hier zwischen dem Netzbetreiber und den EVU eine Lösung gefunden werden. Solche Umlaufkonflikte müssen bei der Disposition berücksichtigt und Folgeverspätungen durch dispositive Maßnahmen minimiert werden.

2.3.4 Dispositive Maßnahmen

Im folgenden sollen die Maßnahmen zur Minderung der Zugverspätungen kurz erläutert werden, die dem Disponenten zur Verfügung stehen. Die Lösungsmöglichkeiten können auch in Kombination für einen oder mehrere Züge angewandt werden. Die Durchführbarkeit der einzelnen Maßnahmen ist immer abhängig von den aktuellen Gegebenheiten. Hierbei spielt insbesondere die vor Ort vorhandene Infrastruktur, aber auch die zur Zeit verfügbare Infrastruktur eine entscheidende Rolle. So muß beispielsweise für einen geplanten Überholungshalt in einer Betriebsstelle zum einen ein entsprechendes Gleis vorhanden sein und zum anderen zum gegebenen Zeitpunkt auch frei sein.

2.3.4.1 Haltezeitverlängerung

Eine dispositive Maßnahme ist die Haltezeitverlängerung eines im Fahrplan des Zuges enthaltenen Verkehrshalts. Dies kann beispielsweise dann erforderlich sein, wenn in der Betriebsstelle eine planmäßige Überholung stattfinden soll, aber der überholende Zug eine Verspätung aufweist. Weiterhin können zusätzliche Betriebshalte eingeführt werden, das sind neue Halte des Zuges, die im Fahrplan nicht vorgesehen sind, aber im Betriebsablauf notwendig werden.

2.3.4.2 Fahrwegalternativen

Falls ein Zug in einem Bahnhof verspätet eintrifft, kann das planmäßig genutzte Gleis belegt sein. In diesem Fall ist ein alternativer Fahrweg zu wählen. Hierbei sollten ins-

besondere Fahrwege bevorzugt werden, die das am selben Bahnsteig gegenüberliegende Gleis verwenden. Ansonsten wäre für die Reisenden ein Bahnsteigwechsel erforderlich. Als Restriktionen sind hierbei zu beachten, daß die Halteplatzlänge im Ausweichgleis ausreichend ist und – falls der Zug mit einem Elektrotriebfahrzeug bespannt ist – nur solche Fahrwege verwendet werden, die über einen Fahrdraht verfügen.

Die Fahrwegwahl kann auch auf die Strecke bezogen werden, so daß bei einer mehrgleisigen Strecke ein anderes Streckengleis verwendet wird. Hierbei ist insbesondere der Gleiswechselbetrieb zu nennen, bei dem das in Fahrtrichtung linke Gleis entgegen der sonst üblichen Richtung signalmäßig gesichert befahren werden kann. Bei zweigleisigen Strecken kann der Gleiswechselbetrieb natürlich nur verwendet werden, falls zu dieser Zeit in der Gegenrichtung kein Zug fährt. Verfügt die Strecke nicht über Gleiswechselbetrieb, so können auch andere, nicht signaltechnisch gesicherte Fahrten (beispielsweise Signalisierter Falschfahrbetrieb oder Falschfahrbetrieb auf Befehl) durchgeführt werden. Von dieser Möglichkeit wird jedoch nur in Ausnahmefällen Gebrauch gemacht. Solche Ausnahmefälle sind beispielsweise die Sperrung eines Richtungsgleises aufgrund von Oberleitungsschäden, unbefahrbaren Schienenbrüchen oder eines Betriebsunfalls. Gegebenenfalls sind bei größeren und längeren Sperrungen auch Züge auf andere Strecken umzuleiten.

2.3.4.3 Verlegung eines Überholungshalts

Überholungshalte können verlegt werden. Wenn beispielsweise eine planmäßige Überholung eines Zuges aufgrund von Verspätungen nur durch eine relativ große Haltezeitverlängerung möglich wäre, kann der Überholungshalt auch in eine andere Betriebsstelle verschoben werden. Ist der schnellere Zug verspätet, ist es sinnvoll, eine spätere Überholungsmöglichkeit für den langsameren Zug zu finden; falls der langsamere Zug verspätet ist, muß eine frühere Überholungsmöglichkeit gesucht werden. Die Überholungshalte werden dann durch eine Haltezeitverlängerung eines Verkehrshalts realisiert, oder ein zusätzlicher Betriebsüberholungshalt wird eingeführt. Hierbei muß der langsamere Zug gegebenenfalls auch über einen anderen Fahrweg geführt werden, auf dem die Überholung stattfinden kann.

2.3.4.4 Fahrzeit verlängern

Auch ist es möglich, die Fahrzeit eines Zuges zu verlängern, um einen Konflikt zu lösen. Damit fährt ein Zug nicht mit seiner fahrplanmäßigen Höchstgeschwindigkeit sondern mit einer geringeren Geschwindigkeit, um so einen Auflaufkonflikt zu lösen.

2.3.4.5 Zugausfall

Bei größeren Verspätungen kann der Disponent in Absprache mit den Eisenbahnverkehrsunternehmen auch einen Zugausfall in Betracht ziehen. Reicht die Wendezeit für den Umlaufplan nicht mehr aus, kann es zweckmäßig sein, den Zug früher wenden zu lassen. So kann erreicht werden, daß der Gegenzug wieder planmäßig verkehrt und sich die Verspätung nicht weiter ins Netz hinein ausbreitet. Die betroffenen Reisenden müssen dann auf andere Züge verwiesen werden. Bei größeren Betriebsstörungen müssen gegebenenfalls auch Züge in dem Störungsbereich ausfallen. Wenn ein Streckengleis einer zweigleisigen Strecke gesperrt ist, können die Fernverkehrszüge zwar großräumig umgeleitet werden, jedoch nicht die Nahverkehrs- und Regionalzüge. Durch die Betriebseinschränkung auf teilweise lange Eingleisigkeit der ursprünglich zweigleisigen Strecke können aus Kapazitätsgründen eventuell nicht alle Züge auf der Strecke verkehren und müssen daher auf einem Teil ihres Laufweges ausfallen. Im schlimmsten Fall einer Sperrung beider Streckengleise muß ein Pendelverkehr jeweils bis zur Streckenunterbrechung und ein Schienenersatzverkehr mit Bussen realisiert werden.

3 Wahrnehmung der Dispositionsaufgaben

In diesem Kapitel sollen die Betriebsleitstellen, die mit der Wahrnehmung der Dispositionsaufgaben beschäftigt sind, näher erläutert werden. Hierin enthalten ist auch ein Überblick von den Anfängen der Zugüberwachung über die Rechnerunterstützte Zugüberwachung (RZü) bis zu dem derzeitigen Stand der Betriebszentralen (BZ).

3.1 Aufgaben einer Zugüberwachung

Die Disposition der Züge auf den Strecken wurde zunächst von den Fahrdienstleitern der Bahnhöfe wahrgenommen. Die Dispositionsentscheidungen konnten jedoch nur kleinräumig getroffen werden, da die Sicht der Fahrdienstleiter örtlich eingeschränkt ist und sie ihre Informationen nur von den jeweils benachbarten Fahrdienstleitern bekamen. Daher wurde schon frühzeitig die Notwendigkeit erkannt, den Zugverkehr auf den Hauptabfuhrstrecken großräumiger zu überwachen.

Zu diesem Zweck wurden Zugüberwachungen (Zü) eingerichtet. Die Aufgabe der Zugüberwachung ist es, den Eisenbahnbetrieb auf den wichtigen Strecken nicht nur großräumig zu überwachen sondern auch zu disponieren. Wenn die vorgesehenen Züge pünktlich verkehren, kann der geplante Fahrplan exakt umgesetzt werden. Dies ist jedoch in der Praxis kaum realisierbar, da Abweichungen von den vorgegebenen Planzeiten sich nicht vollkommen vermeiden lassen. Es werden dispositive Eingriffe in den Betriebsablauf notwendig, um die auftretenden Folgeverspätungen zu minimieren und möglichst schnell den geplanten Zustand wieder zu erreichen.

Im nachfolgenden wird ein Überblick von der manuellen Zugüberwachung über die Rechnerunterstützte Zugüberwachung bis zu dem Konzept der Betriebszentrale gegeben.

3.2 Manuelle Zugüberwachung

Den Beginn der Entwicklung stellt die manuelle Zugüberwachung dar, bei der noch keine Automatisierung vorhanden war. Bei diesem Verfahren werden von den Fahrdienstleitern der einzelnen Bahnhöfe die Durchfahrtszeiten der Züge fernmündlich an die Zugüberwachung mitgeteilt. Die Disponenten zeichnen aufgrund der Zuglaufmeldungen die Ist-Zeit-Weg-Linien der Züge in ein Arbeitsblatt, in dem die Zeit-Weg-Linien des Sollfahrplans vorgedruckt sind. Abweichungen vom Sollfahrplan können dadurch sofort erkannt werden. Mit Hilfe einer manuellen Extrapolation durch ent-

sprechendes Verschieben der Zeit-Weg-Linien kann der Disponent die sich in der Zukunft anbahnenden Konflikte prognostizieren. Auf dieser Basis muß der Disponent seine Entscheidungen treffen. Hierbei kann er nur in einem beschränkten Maße Folgekonflikte, die sich aufgrund seiner Dispositionsentscheidung ergeben, erkennen. Der Disponent teilt seine Entscheidungen fernmündlich den Fahrdienstleitern und gegebenenfalls auch den Triebfahrzeugführern mit, die diese dann in den Betriebsablauf umsetzen müssen. Die vom Disponenten bearbeiteten Belegblätter werden zur Dokumentation des Betriebsablaufs archiviert.

Die manuelle Zugüberwachung hat jedoch zahlreiche Nachteile; unter anderem sind hier zu nennen:

- Der Disponent benötigt zum Entgegennehmen der Zugmeldungen und zum Zeichnen der Zeit-Weg-Linien viel Zeit, ihm steht also entsprechend wenig Zeit zum Disponieren zur Verfügung.
- Es können nur die Zuglaufmeldungen von besetzten Zugmelde- oder Zugfolgestellen übermittelt werden, das sind beim Einsatz von Selbstblocksignalen auf der Strecke nur noch die Fahrdienstleiter in den Bahnhöfen. Deshalb erhält der Disponent keine Meldungen vom Fahrtverlauf zwischen den Bahnhöfen; die Zuglaufverfolgung ist damit sehr grobgerastert.
- Durch die erforderliche örtliche Besetzung der Zugmelde- oder Zugfolgestellen und der fernmündlichen Übermittlung der Zuglaufmeldungen entsteht ein hoher Zeit- und Personalaufwand.
- Aufgrund der fernmündlichen Übertragung und der manuellen Bearbeitung des Belegblatts ist die Größe des Dispositionsbereichs begrenzt. Der Disponent hat in der Regel nur die Kenntnis über den Betriebsablauf in seinem Überwachungsbereich und keinen Überblick über das gesamte Betriebsgeschehen. Eine weiträumige Disposition ist daher nicht möglich, diese ist jedoch bei größeren Geschwindigkeiten unumgänglich.
- Die Meldungen kommen verzögert beim Disponenten an, da die Fahrdienstleiter die Zugmeldungen erst dann abgeben, wenn sie Zeit haben. Dadurch hat der Disponent häufig keine Kenntnis über das aktuelle Betriebsgeschehen.
- Diese Probleme verschärfen sich, sobald Betriebsstörungen auftreten. Wenn beispielsweise bei einer Signalstörung die Fahrdienstleiter für mehrere Züge schriftliche Befehle ausstellen müssen, benötigen Sie viel Zeit, um den Betrieb aufrecht zu erhalten, und haben entsprechend wenig Zeit, die Zuglaufmeldungen an die Zugüberwachung zu übermitteln. Jedoch ist besonders bei Betriebsstörungen eine gute Disposition erforderlich.

Gerade der letzte Punkt stellt das größte Problem der manuellen Zugüberwachung dar. Denn im gestörten Betrieb haben die Disponenten keinen zeitnahen Überblick über den aktuellen Betriebsablauf, da sie die für sie notwendigen Zuglaufmeldungen erst verspätet erhalten. Ohne diese Kenntnis können sie jedoch ihre Dispositionsentscheidungen nicht ausreichend beurteilen.

Erstmals in Deutschland wurde die manuelle Zugüberwachung 1928 auf der Strecke Dresden – Leipzig eingesetzt. Da sich diese Zugüberwachung bewährt hat, wurden anschließend auch in den übrigen damaligen Direktionsstandorten weitere Zugüberwachungen eingerichtet. Die technische Einrichtung der Zugüberwachungen blieb über Jahrzehnte hinweg unverändert. So entstanden insgesamt 56 Zugüberwachungen bei den 15 Direktionen. Die Größe der Überwachungsbereiche lag zwischen 40 und 200 km, entsprechend lag die Meldestellenanzahl zwischen 10 und 34 pro Überwachungsbereich [88]. Sie wurde in den 70er Jahren mit dem eingeführten Zugbahnfunk ergänzt [65].

3.2.1 Belegblattdrucker

Die Nachteile der manuellen Zugüberwachung wurden frühzeitig erkannt. Man versuchte, mit Hilfe von Belegblattdruckern eine Teilautomatisierung zu realisieren. Im Jahr 1952 wurde der Zuglaufschreiber als Vorläufer des Belegblattdruckers im Strekkenstellwerk Nürnberg für die ca. 100 km lange Stecke von Nürnberg nach Regensburg eingeführt. Erste Anwendung fand der Belegblattdrucker im Jahr 1965 in der ehemaligen Bundesbahndirektion Köln für die ca. 47 km lange Strecke von Köln-Deutz nach Unkel. Diese Drucker verwenden Informationen der vorhandenen Gleisfreimeldeanlagen, um daraus Zeit-Weg-Linien-Diagramme zu zeichnen. Die Belegblattdrucker hatten neben der Möglichkeit der automatischen Aufzeichnung der Zeit-Weg-Linien den weiteren Vorteil einer genaueren und aktuelleren Positionsbestimmung der Züge gegenüber den fernmündlichen Meldungen [88]. Eventuelle Abweichungen der Züge von ihrem Fahrplan mußten jedoch nach wie vor von Hand aus den betreffenden Bildfahrplänen entnommen werden. Obwohl die fernmündliche Übertragung der Zuglaufmeldungen entfiel, konnten sich die Belegblattdrucker nicht durchsetzen, da sie im Verhältnis zum Rationalisierungsgewinn zu teuer waren [66].

Schon Mitte der 70er Jahre gab es erste Ansätze zur weitergehenden Automatisierung [53]. Es entstand die sogenannte „Kybernetische Insel“ in Hannover, bei der die Zeit-Weg-Linien erstmals auf einem Sichtgerät mit Speicherbildröhre anzeigt werden konnten. In der ersten teilautomatisierten Betriebsleitzentrale für die S-Bahn Stuttgart

erfolgte die Ausgabe der Zeit-Weg-Linien (Soll und Ist) erstmals auf Farbmonitoren [99].

3.3 Rechnerunterstützte Zugüberwachung

Zur Inbetriebnahme der Neubaustrecken (NBS) Hannover – Würzburg und Mannheim – Stuttgart (1991) reichte die manuelle Zugüberwachung nicht aus. Hierfür ausschlaggebend sind zwei Gründe. Zum einen verkehren auf den NBS die Züge mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h und müssen vor den Knotenbahnhöfen wieder zwischen den übrigen Zügen eingefädelt werden. Damit an diesen Einfädelungen keine Wartezeiten entstehen, ist eine genaue Fahrzeitprognose für eine gute Disposition erforderlich. Der Bereich der manuellen Zugüberwachung konnte aufgrund der höheren Belastung der Disponenten nicht auf die notwendige Größe, die für eine weiträumige Disposition bei den hohen Geschwindigkeiten erforderlich wäre, angepaßt werden. Zum anderen existieren auf den Neubaustrecken nur wenige Stellwerke, die jedoch große Stellbereiche haben. Daher würden die Zuglaufmeldungen nicht in dem erforderlichen Maße zur Verfügung stehen können. Mitte der 80er Jahre wurde aufgrund der gewonnenen Erfahrungen bei der Teilautomatisierung von dem damaligen Bundesbahnzentralamt (BZA) in München beschlossen, ein Pflichtenheft für die Rechnerunterstützte Zugüberwachung (RZü) aufzustellen. Zur Inbetriebnahme der Neubaustrecken sollten die Disponenten auf eine Rechnerunterstützte Zugüberwachung zurückgreifen können [98].

Im Pflichtenheft für die Rechnerunterstützte Zugüberwachung werden die geforderten Automatisierungen formuliert [16], [99]:

- Es soll eine möglichst weitgehende Automatisierung der ständig wiederkehrenden Tätigkeiten in den Bereichen erfolgen, wo dies technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist.
- Durch eine Automatisierung sollen sowohl die Disponenten als auch die Fahrdienstleiter entlastet werden (Zugmeldungsabgabe und -empfang).
- Der Disponent soll die Zeit-Weg-Linien nicht mehr manuell zeichnen müssen.
- Die Zugüberwachung soll über möglichst genaue und aktuelle Zuglaufmeldungen verfügen.
- Die Daten der Zugüberwachung sollen archiviert werden, so daß spätere Auswertungen und Statistiken möglich sind.
- Insgesamt soll durch die RZü die Qualität der Disposition gesteigert werden.

Die Grundlage des Systems der RZü sind die Zuglaufverfolgungsdaten. Diese müssen gewonnen, übertragen, verarbeitet und angezeigt werden. Die Drucktasten- und Elektronischen Stellwerke verfügen über automatische Gleisfreimeldeeinrichtungen. Auf dem Stelltisch bzw. auf jeder Stelltafel oder am Monitor können mittels der Gleisfreimeldung einzelne Gleisabschnitte als frei oder belegt erkannt werden. Die durch einen Zug belegten Gleisabschnitte werden rot ausgeleuchtet. An dieser Darstellung kann der Fahrdienstleiter erkennen, ob ein Gleis durch einen Zug belegt ist oder nicht. Er kann aber nicht ohne weiteres ableiten, welcher Zug sich in dem Gleisabschnitt befindet.

Um dieses Manko zu beheben, wurden die Stellwerke um Zugnummernmeldeanlagen erweitert. Diese wurden für die Drucktastenstellwerke entwickelt und durch zusätzliche Optiken für die Zugnummern in den Gleisabschnitten realisiert. Bei den Elektronischen Stellwerken wird die Zugnummer direkt in den Gleisplandarstellungen auf dem Bildschirm angezeigt.

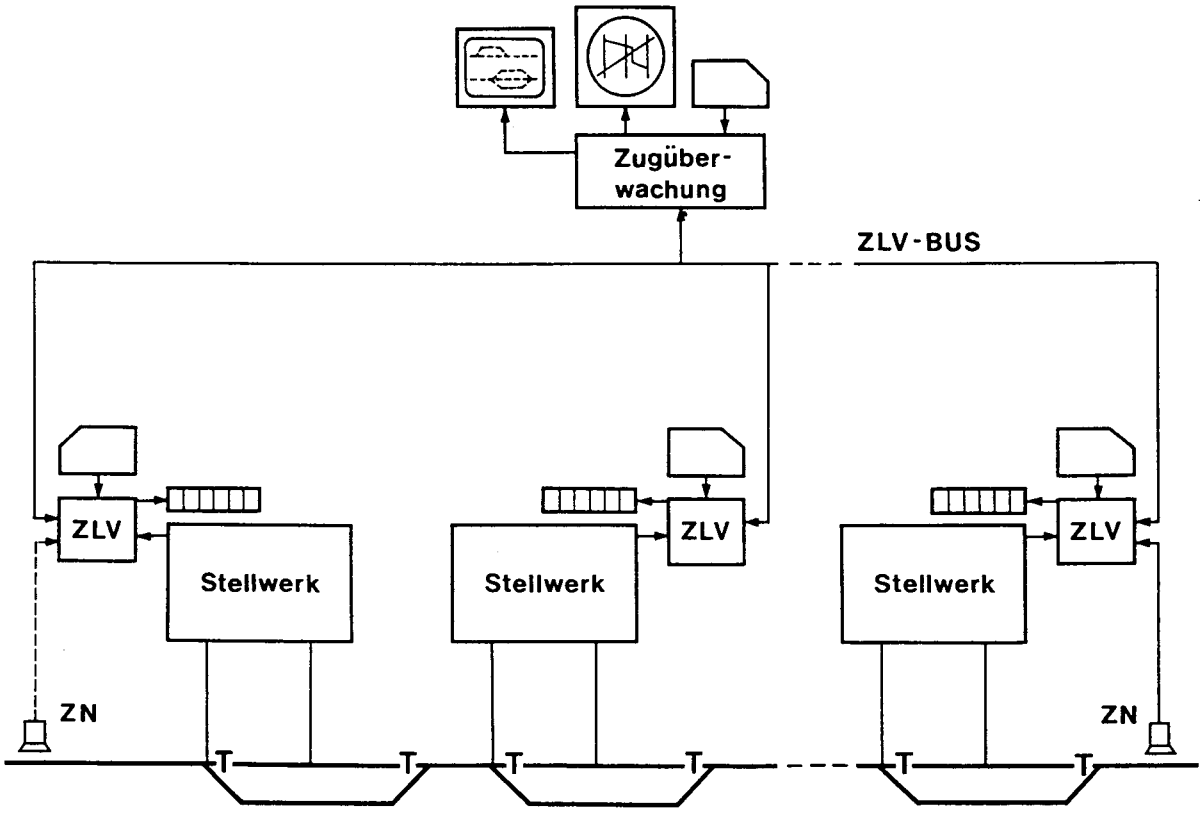

Abb. 5: Konzept einer RZü (aus [7])

Der Fahrdienstleiter, in dessen Bereich der Zug beginnt, gibt die Zugnummer über eine numerische Tastatur in das betreffende Feld ein. Die Zugnummer wird nun mittels der Zugnummernmeldeanlage von einer Optik in die nächste weitergeschaltet. Dazu werden die Fahrstraßeninformationen genutzt um festzustellen, in welche Optik

die Zugnummer weitergereicht werden muß. Grundsätzlich erfolgt die Weiterschaltung der Zugnummer bei Haltfall des betreffenden Hauptsignals.

Die Zugnummernmeldeanlagen schalten die Zugnummern in den Stellwerken weiter. Für die Kommunikation zwischen den einzelnen Stellwerken ist der Zuglaufverfolgungsbus (ZLV-Bus) vorhanden. Dieser ist für die Weitergabe der Zugnummern zwischen den Stellwerken erforderlich. Über diesen ZLV-Bus sind alle betroffenen Stellwerke sowie die RZü-Zentrale miteinander verbunden (siehe Abb. 5). Die Zuglaufmeldungen werden als Telegramme über den Bus weitergegeben. Durch Ankopplung an diesen Bus erhält die RZü-Zentrale die erforderlichen aktuellen Zuglaufmeldungen. Eine typische Konfiguration einer RZü-Zentrale ist in Abb. 6 dargestellt.

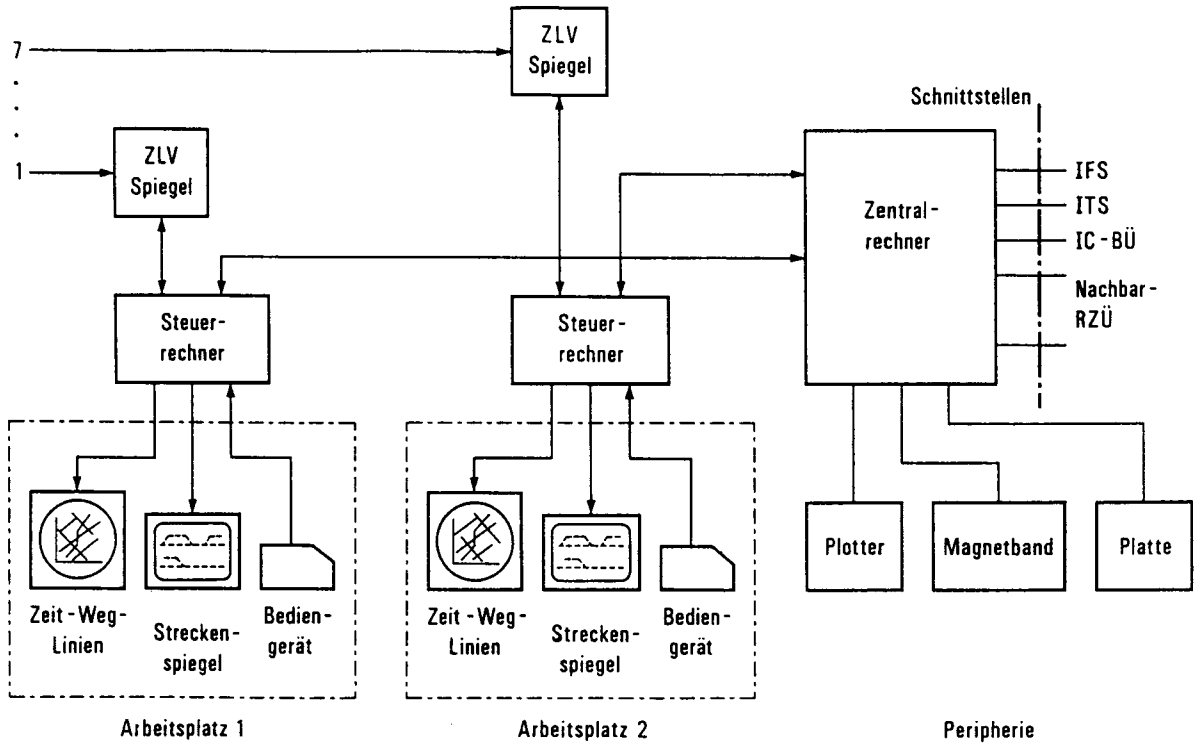

Abb. 6: Konfiguration einer RZü-Zentrale (aus [7])

Damit ein Soll-Ist-Vergleich anhand der erhaltenen Zuglaufmeldungen durchgeführt werden kann, muß der Sollfahrplan in der RZü-Zentrale vorliegen. Dieser mußte 1989 bei Einführung der RZü noch von Hand aus den Bildfahrplanblättern übernommen und eingegeben werden. Mittlerweile wird der Fahrplan aus neueren EDV-Anwendungen übernommen. Anhand des Soll-Ist-Vergleichs kann ermittelt werden, ob der Zug eine Verfrühung oder eine Verspätung besitzt. Diese Angabe wird bei allen Darstellungen hinter der Zugnummer angegeben, so daß für den Disponenten immer die Verfrühung bzw. Verspätung ersichtlich ist.

Zur Visualisierung der Informationen auf Bildschirmen haben sich zwei Darstellungsformen etabliert, zum einen die Zeit-Weg-Linien-Darstellung (ZWL) und zum anderen die Streckenspiegel-Darstellung (SSP).

In den ersten Realisierungen einer RZü wurden zur Anzeige der ZWL Vektorsichtgeräte verwendet. Hier konnte eine Strecke von ca. 120 km über einen Zeitraum von etwa 90 Minuten angezeigt werden. Die Anzeige der SSP erfolgte auf Monitoren in einer Textdarstellung [5], [79]. Diese Geräte wurden im Laufe der Zeit durch moderne hochauflösende Farbmonitore ersetzt. Hiermit war es dann auch möglich, durch die Farbdarstellung die Daten übersichtlicher und in einem größeren Umfang anzuzeigen.

Die nachfolgenden Darstellungen der ZWL- und SSP-Bilder (siehe Abb. 7 und Abb. 8) sind Zeichnungen aus dem Pflichtenheft der Rechnerunterstützten Zugüberwachung und hier nur zur Veranschaulichung angegeben. Sie entsprechen nicht exakt den Bildschirmdarstellungen, die in der RZü tatsächlich verwendet werden. Bildschirmdarstellungen der in den ersten RZü verwendeten Monitore sind z. B. in [54] und [74] zu finden.

3.3.1 Zeit-Weg-Linien-Darstellung

Die Zeit-Weg-Linien-Bilder (ZWL, siehe Abb. 7) haben eine Darstellung mit Vergangenheits- und Zukunftsbereich (üblicherweise ist die Aufteilung des Bildschirms 1/3 „Vergangenheit“ zu 2/3 „Zukunft“). Dabei entsprechen die Zeit-Weg-Linien im Vergangenheitsbereich den aufgrund der Zuglaufmeldungen ermittelten tatsächlich gefahrenen Zeit-Weg-Linien. Im Zukunftsbereich werden die Soll-Zeit-Weg-Linien aufgrund der aktuellen Daten als Prognose der zu erwartenden Zeit-Weg-Linien der Züge erzeugt. Minutenweise wird die aktuelle Zeitlinie im Bild weitergeschaltet, nach jeweils zehn Minuten wird der Bildschirmausschnitt komplett verschoben.

Bei Verspätungen werden die Soll-Zeit-Weg-Linien jedoch nur parallel verschoben. Anhand der Vorausschau kann der Disponent nun überprüfen, wo evtl. ein Konflikt auftritt. Da das System jedoch keine Konflikterkennung beherrscht, muß der Disponent aufgrund seines Wissens und seiner Erfahrung entscheiden, ob zwei Züge einen Konflikt haben oder nicht. Ihm stehen hierzu nur die Zeit-Weg-Linien der Züge zur Verfügung, weitergehende Informationen oder Hilfsmittel besitzt er nicht; insbesondere werden keine Sperrzeitentreppen der Züge dargestellt. Die Prognose der Zeit-Weg-Linien durch Parallelverschiebung ist nicht exakt, denn z. B. im Verspätungsfall werden die Triebfahrzeugführer versuchen, möglichst straff zu fahren, um die Verspätung wieder einzufahren. Hierzu sind bei der Fahrplankonstruktion ent-

sprechende Zuschläge (Regelzuschlag, Bauzuschlag, …) zur der technischen Fahrzeit hinzugerechnet, die zu einer Fahrzeitkürzung führen können. Dadurch ist die Konflikterkennung durch den Disponenten eingeschränkt, d. h. er muß aufgrund seiner Erfahrung erkennen, ob Konflikte entstehen werden oder nicht.

Falls der Disponent Konflikte erkannt hat, bietet die RZü ihm die Möglichkeit, die Soll-Zeit-Weg-Linien parallel zu verschieben bzw. auch neue Zeit-Weg-Linien zu konstruieren. Er kann dann erkennen, ob die Konflikte beseitigt wurden. So kann der Disponent unterschiedliche Konfliktlösungsvarianten durchprobieren und sich dann für die seiner Meinung nach beste Lösung entscheiden.

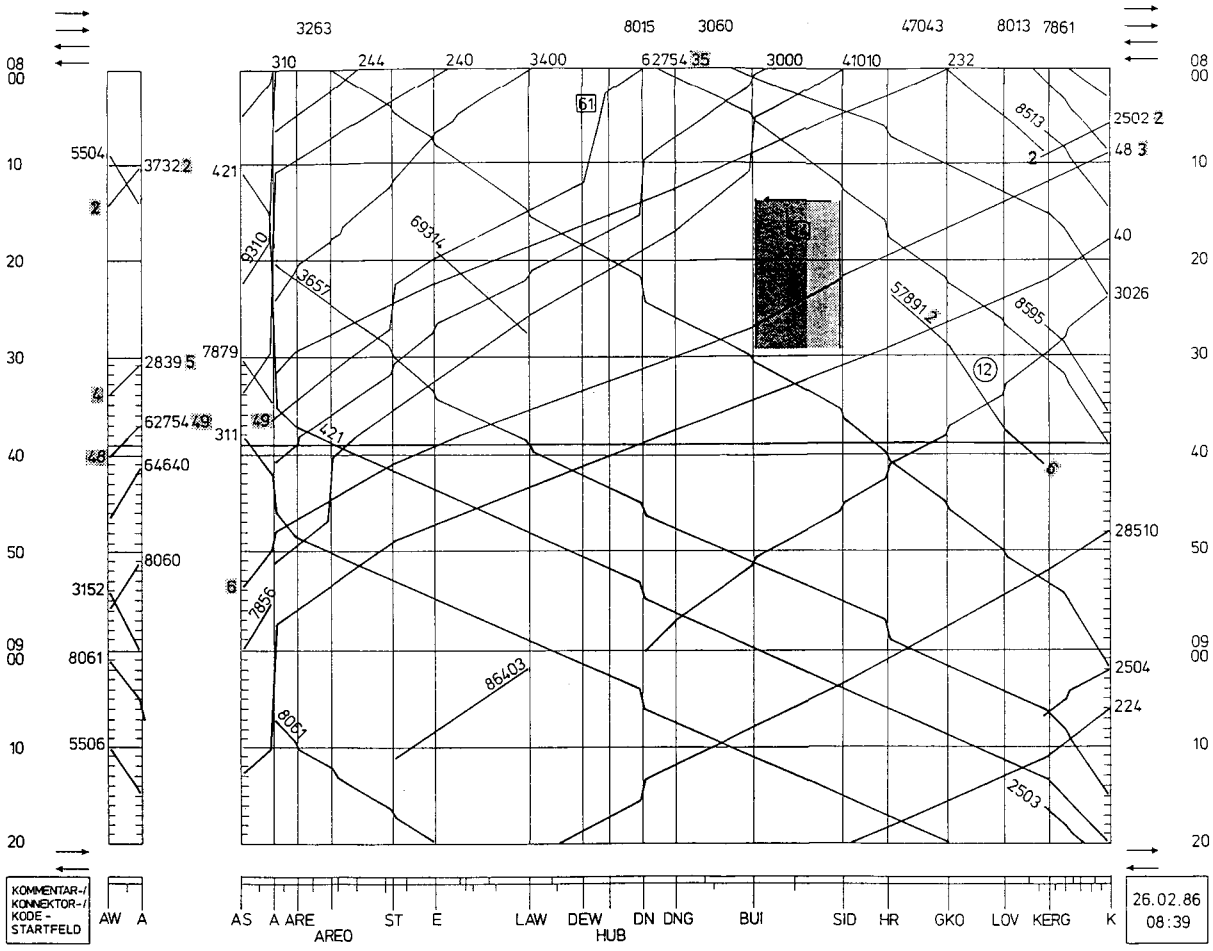

Abb. 7: Zeit-Weg-Linien-Darstellung (aus [16])

3.3.2 Streckenspiegel-Darstellung

Bei der Streckenspiegel-Darstellung (SSP, siehe Abb. 8) werden die Strecken- und die wichtigsten Bahnhofsgleise angezeigt. Aufgrund dieser schematischen Übersicht über die Gleistopologie kann der Disponent erkennen, in welcher Betriebsstelle beispielsweise noch ein Gleis für eine Überholung zur Verfügung steht. Weiterhin sind

Lage und Art der Bahnsteige, Nutzlängen sowie die Verfügbarkeit der Gleise (keine E-Traktion, …) darstellbar. Die Standorte der Züge werden durch ihre Zugnummern – gegebenenfalls gefolgt von ihrer Abweichung vom Fahrplan – in den jeweiligen Streckenabschnitten oder Bahnhofsgleisen angezeigt. Der Disponent erhält so einen Überblick über den Belegungszustand der Gleise in seinem Bereich. Die Signale werden durch kleine Dreiecke auf dem Monitor angezeigt, zusätzlich kann der Disponent bei Fahrtstellung der Signale die eingestellten Fahrstraßen erkennen.

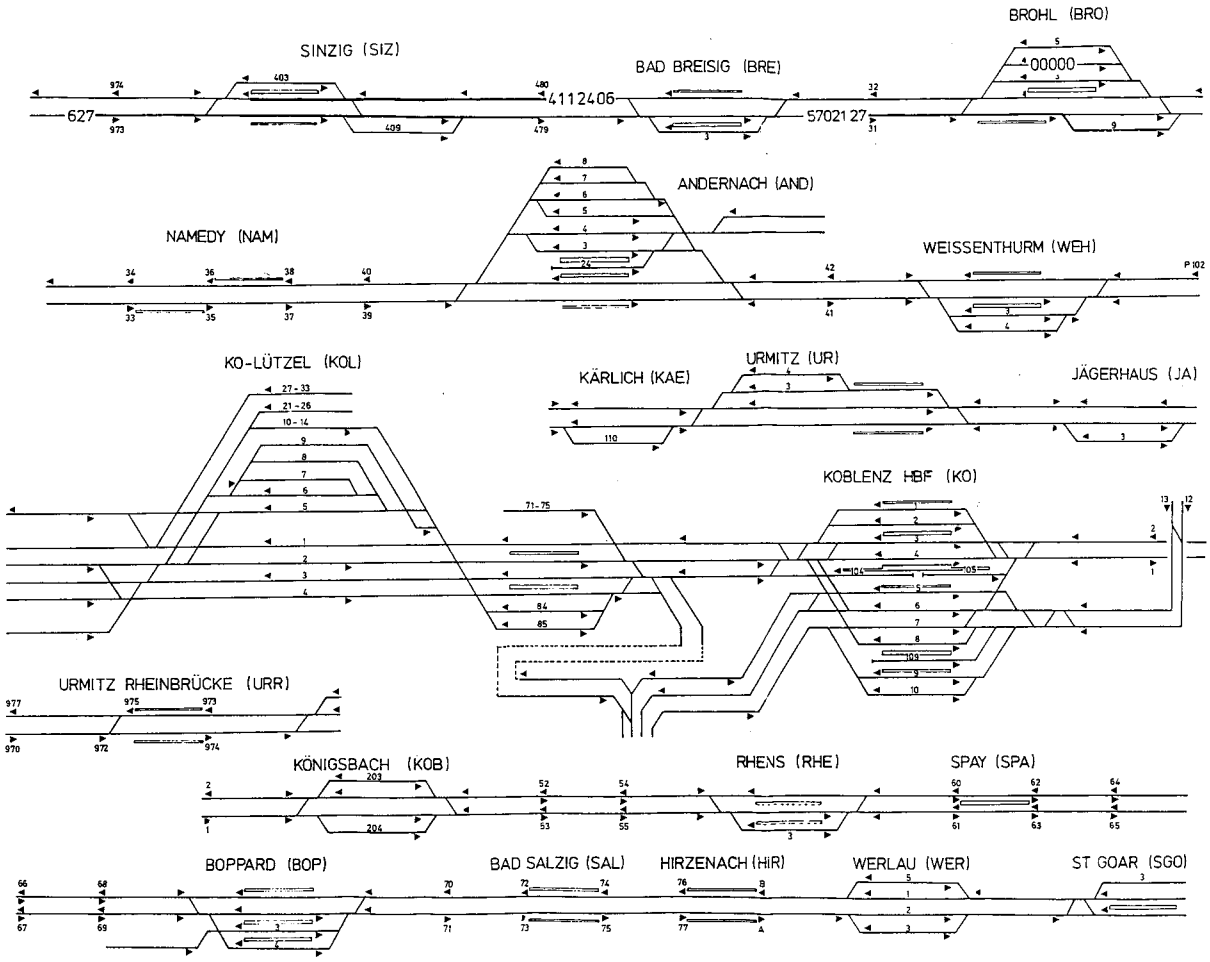

Abb. 8: Streckenspiegel-Darstellung (aus [16])

Die gewonnenen Daten werden nicht nur zur Anzeige auf den Monitoren verwendet, sie werden auch zur Dokumentation des tatsächlichen Betriebsablaufs gespeichert. So können die Zeit-Weg-Linien auch nachträglich ausgedruckt werden. Außerdem können verschiedene Statistiken ausgegeben werden (Verspätungen der Züge, …).

3.3.3 Zeitliche Entwicklung der RZü

Nachdem das Pflichtenheft für die Rechnerunterstützte Zugüberwachung fertiggestellt war, erfolgte die Ausschreibung der ersten RZü-Zentralen. An der Ausschrei-

bung beteiligten sich zwei deutsche Firmen, zum einen die damalige Deutsche Systemtechnik GmbH (DST) in Kiel, die 1990 den Bahnbereich von PHILIPS übernahm und heute zur Vossloh Systemtechnik GmbH gehört, und zum anderen SEL Alcatel in Stuttgart. Die RZü-Zentralen Köln und Hannover wurden an die DST und die RZü-Zentralen Nürnberg, Karlsruhe und Frankfurt an SEL Alcatel vergeben. Am 29. Mai 1989 wurde der südliche Streckenabschnitt der Neubaustrecke Hannover – Würzburg als erster RZü-Bereich in Nürnberg in Betrieb genommen. Im Herbst 1989 erfolgte die Inbetriebnahme des ersten Bereichs der RZü Köln. Bis zum 3. April 1991 konnte der RZü-Regelbetrieb in allen Direktionsstandorten zur Inbetriebnahme der beiden Neubaustrecken eingeführt werden. Bis Mitte der 90er Jahre wurden weitere RZü-Bereiche sowie neue RZü-Zentralen in Hamburg und Essen in Betrieb genommen. Mittlerweile sind alle wichtigen Hauptabfuhrstrecken in Deutschland durch RZü-Bereiche abgedeckt. Durch die Neuordnung des Geschäftbereichs Netz und später der DB Netz AG wurden die RZü an den ehemaligen Niederlassungsstandorten konzentriert (beispielsweise wurden die RZü Köln und Essen in Duisburg zusammengelegt).

In den beiden Nachbarländern Österreich und der Schweiz kamen Anfang der 90er Jahre identische Systeme zum Einsatz. So wurde die erste RZü der ÖBB in Linz von Alcatel Austria und die erste RZü der SBB in Zürich von der DST aufgebaut (siehe hierzu näheres im Abschnitt 3.6).

Die Betriebserfahrungen mit der Rechnerunterstützten Zugüberwachung haben gezeigt, daß sich der Disponent durch die Entlastung von Routinearbeiten (insbesondere weniger Kommunikationsaufwand mit den Fahrdienstleitern) voll auf seine Dispositionstätigkeit konzentrieren kann. Durch die automatische detaillierte Zuglaufverfolgung hat der Disponent eine genaue und aktuelle Sicht des Betriebsgeschehens, die als Grundlage für seine Dispositionsentscheidungen erforderlich ist. Außerdem ist der Disponent durch die Rechnerunterstützung eher in der Lage, sich anbahnende Konflikte zu erkennen. Weiterhin konnten durch die Einführung der Automatisierung in der RZü die Überwachungsbereiche der Disponenten vergrößert werden. Zum Beispiel konnten in der ehemaligen Bundesbahndirektion Köln drei Zü-Bereiche durch einen RZü-Bereich ersetzt werden. Die Streckenlänge eines Überwachungsbereichs wuchs auf ca. 100 bis 270 Kilometer an. Da der Disponent dadurch auch einen weiträumigeren Überblick über das Betriebsgeschehen besitzt, kann er auch seine Dispositionsentscheidungen besser beurteilen und damit die Qualität seiner Entscheidungen und auch des gesamten Betriebsablaufs verbessern [45].

Die Rechnerunterstützte Zugüberwachung war ein erster wichtiger Schritt zur Automatisierung des Bahnbetriebes. Jedoch hat die RZü den Nachteil, daß die Disponen-

ten nicht direkt ins Betriebsgeschehen eingreifen können, was z. B. für kurzfristige Entscheidungen wichtig wäre. Die Disponenten in der RZü müssen ihre Entscheidungen fernmündlich an die entsprechenden Fahrdienstleiter auf den örtlichen Stellwerken übermitteln, die dann die Entscheidungen umsetzen. Anschließend haben sie zu überprüfen, ob die Fahrdienstleiter die Dispositionsentscheidung richtig umgesetzt haben.

3.4 Betriebszentralen der Deutschen Bahn

Der derzeitige Stand der Entwicklung bei der Deutschen Bahn geht dahin, die operative Ebene mit der dispositiven Ebene in einer Betriebszentrale (BZ) zu verknüpfen. Die Fahrdienstleiterarbeitsplätze werden dann von den Elektronischen Stellwerken vor Ort in die Betriebszentrale verlegt. Aus dieser Betriebszentrale können dann die sowohl Elektronische Stellwerke als auch mit notwendigen Anpassungsschaltungen Relaisstellwerke ferngesteuert werden. Der Fahrdienstleiter hat dann alle unterschiedlichen Stellwerksbauformen unter einer gemeinsamen, gleichen Benutzeroberfläche auf einem Rechner und kann alle angeschlossenen Stellwerke bedienen. Hierzu ist allerdings eine signaltechnisch sichere Fernsteuerung erforderlich, so daß auch Hilfsbedienungen in den ferngesteuerten Stellwerken möglich sind.

Nach der Zusammenlegung der operativen und der dispositiven Ebene des Eisenbahnbetriebes bei der DB Netz AG werden gemäß heutiger Planung insgesamt sieben BZ für ganz Deutschland eingerichtet. In der BZ sollen Strecken und Knoten im Gesamtzusammenhang disponiert und gesteuert werden. Eine Betriebszentrale soll etwa 7000 – 8000 Züge täglich auf 3000 – 4000 Streckenkilometern steuern und disponieren. Insgesamt werden dann ca. 6000 – 7000 Hauptsignale und 6000 – 7000 Weichen zu stellen und zu überwachen sein [4].

Der Gesamtbereich einer BZ wird dann in mehrere Steuerbezirke unterteilt, die zumindest die Größe eines heutigen RZü-Bereichs umfassen sollen [75]. Die Zugüberwachung (Zü) wird in der BZ als Zugdisponent (Zd) bezeichnet. Für das Disponieren und Steuern der Züge innerhalb eines Steuerbezirks ist ein Zuglenker (Zlr) verantwortlich. Hierfür hat er die aus der RZü bekannten Bildschirmdarstellungen zur Verfügung. Zum einen ist dies die Darstellung der Zeit-Weg-Linien (ZWL), in der üblicherweise zu einem Drittel die Vergangenheit und zu zwei Dritteln die Zukunft angezeigt wird. Die Vergangenheit bis zur aktuellen Uhrzeit entspricht dabei den tatsächlich gefahrenen Zeit-Weg-Linien der Züge. Für die Zukunft ist dies eine Prognose über die noch zu fahrenden Zeit-Weg-Linien. Zum anderen sind dies die Streckenspiegel-Bilder (SSP). Hierbei wird die Infrastruktur schematisch abgebildet, d. h. alle

Blockabschnitte, Überholungsgleise usw. sind dargestellt. In den jeweiligen Abschnitten wird dann die Nummer des betreffenden Zuges eingeblendet. Falls für den Zug ein Fahrplan vorliegt, wird zusätzlich hinter der Zugnummer die Verspätung oder Verfrühung des Zuges angegeben. Die Darstellungen der ZWL- und SSP-Bilder entsprechen denen der RZü und werden daher hier nicht näher erläutert, die Bildschirmabbildungen sind beispielsweise in [51] zu finden.

Die sicherheitsrelevanten und ortsbezogenen Tätigkeiten für Zug- und Rangierfahrten werden von den örtlich zuständigen Fahrdienstleitern (özF) in Abstimmung mit dem Zuglenker durchgeführt. Hierzu verfügt er über die volle Bedien- und Anzeigeoberfläche des ESTW. Der Zuglenker ist für die Disposition und Steuerung des Streckenbetriebes zuständig, und der örtlich zuständige Fahrdienstleiter führt alle ortsbezogenen Tätigkeiten aus. Die räumliche Nähe von Zlr und özF gewährleistet insbesondere im Störungsfall eine bestmögliche Kommunikation. Eine Übersicht über die ESTW-Planungen bei der DB Netz AG, die aus den BZ gesteuert werden sowie die eine Karte mit den Strecken, die über eine online-Zugdisposition aus einer BZ ausgerüstet sind, ist in [83] zu finden.

Die neuen ESTW sind bereits für eine Steuerung aus der BZ vorbereitet. Zusätzlich zu diesen können ältere Bauformen der ESTW hochgerüstet werden sowie Relaisstellwerke mit einer Fernsteuerung versehen werden, so daß auch diese Stellwerke in die BZ integrierbar sind [52].

Im nachfolgenden sollen kurz die Systeme erläutert werden, die den Disponenten in der BZ zur Erfüllung seiner Aufgaben zur Verfügung stehen.

3.4.1 Bedienplatzsystem BPS 901

Für die Ausstattung der Arbeitsplätze und die Bedienung der verschiedenen rechnerunterstützten Systeme in der BZ wurde das Bedienplatzsystem BPS 901 entwikkelt. Die Hardware des Standardbedienplatzes (siehe Abb. 9) umfaßt den Bedienplatzrechner sowie acht Monitore und ist universell nutzbar, d. h. der Bedienplatz ermöglicht sowohl das Bedienen der Steuerungs- und Dispositionssysteme als auch der Systeme der Betriebsleittechnik und des Störungsmanagements [32].

Am Bedienplatz für den özF können die beim Elektronischen Stellwerk verwendeten Darstellungen (Bereichsübersicht und Lupenbild) angezeigt werden. Hiermit ist sowohl eine vollständige Regelbedienung eines ESTW als auch eine Hilfsbedienhandlung, wozu signaltechnisch sichere Darstellungen erforderlich sind, möglich.

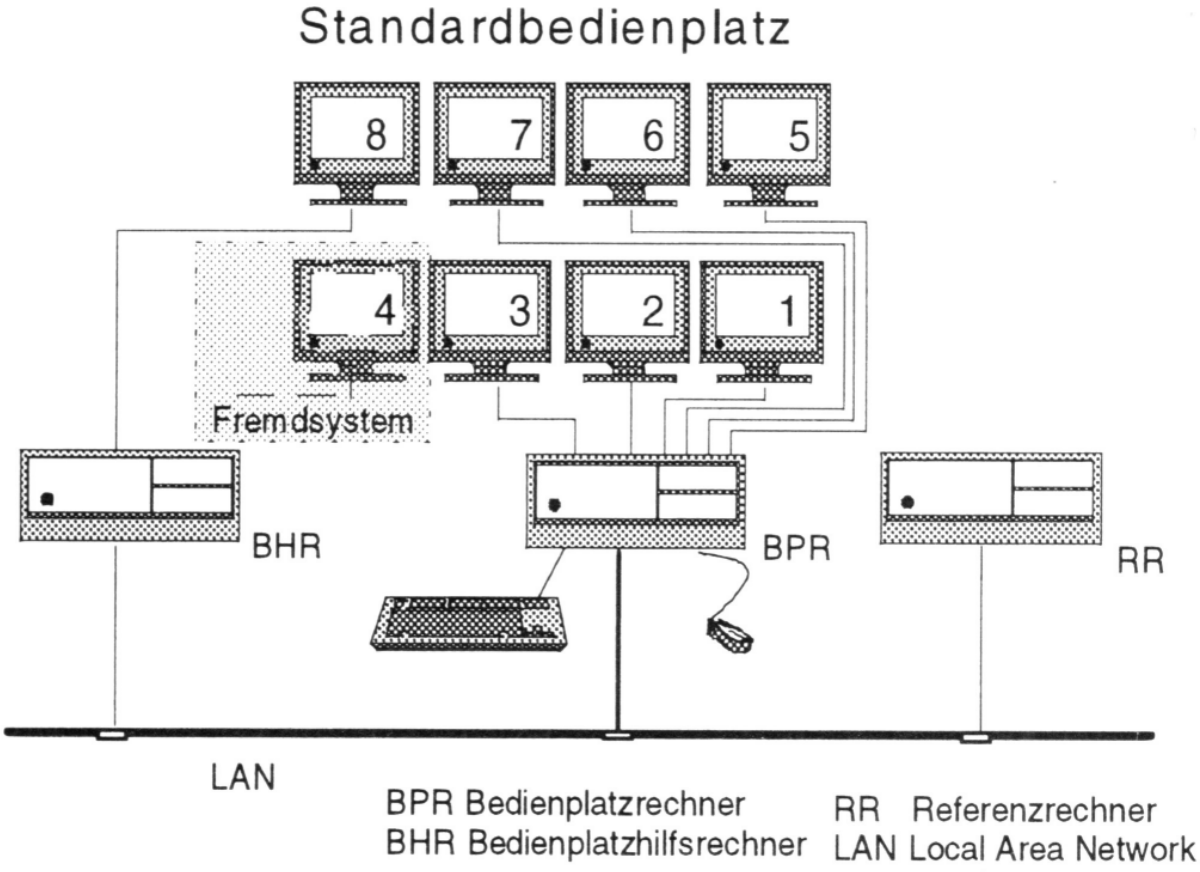

Abb. 9: Bedienplatzsystem BPS 901 (aus [32])

Ist der Bedienplatz einem Zuglenker zugeordnet, kann er sich die Darstellungen des Dispositionssystems für seinen Arbeitsplatz auf den Monitoren anzeigen lassen. Hierzu zählen insbesondere die oben beschriebenen Zeit-Weg-Linien- und Streckenspiegel-Bilder (ZWL und SSP). Die für das Zuglenksystem notwendige Gleisbenutzungstabelle, in der die Gleisangaben für alle Zugfahrten in allen Betriebsstellen angegeben ist, kann der Bediener einsehen und Änderungen für Planabweichungen vornehmen.

Das universelle Bedienplatzsystem, bei dem alle Funktionen auf einem Arbeitsplatz ausgeführt werden können, hat zusätzlich den Vorteil, daß nur ein Reservearbeitsplatz notwendig ist, falls technische Störungen an einem Arbeitsplatz auftreten, z. B. beim Ausfall eines Monitors. Dieser Reservearbeitsplatz kann dann die Funktion des ausgefallenen Arbeitsplatzes einnehmen, sowohl den des özF als auch den eines Zuglenkers. Somit muß nicht für jeden dieser Arbeitsplätze ein eigener Reservearbeitsplatz vorhanden sein.

3.4.2 Zugnummernmeldesystem ZNS 901

Die Betriebzentralen müssen analog zur RZü mit den aktuellen Zuglaufmeldungen versorgt werden. Hierzu werden die Zugnummernmeldeanlagen, die schon für die RZü verwendet wurden, weitergenutzt. Ebenso dient der ZLV-Bus weiterhin zur Übertragung der Zuglauftelegramme. In der BZ ist das Zugnummernmeldesystem ZNS 901 an den ZLV-Bus angeschlossen. Die über den Bus eintreffenden Telegramme werden weiterverarbeitet und aufbereitet, so daß sie für die Darstellungen der RZü bzw. der BZ zur Verfügung stehen [81]. Als Nachfolgeprodukt wurde für das BZ-Konzept von Alcatel die Zugnummernmeldeanlage ZN L2000 entwickelt [73].

3.4.3 Zuglenksystem ZLS 901

In den neueren Elektronischen Stellwerken wurde die Möglichkeit geschaffen, Fahrstraßen automatisch einstellen zu können, um die Fahrdienstleiter von Routinearbeiten zu entlasten. Das hierzu entwickelte Zuglenksystem ZLS 901 stellt auf die Zugnummer bezogen die vorher festgelegten Zugfahrstraßen ein.

Diese Zuglenkung geht weit über die schon bei Drucktastenstellwerken bekannten Verfahren „Selbststellbetrieb“ sowie „Zuglenkung mit Lenkziffer“ hinaus. Beim Selbststellbetrieb wird ausgehend vom Startsignal immer die gleiche Fahrstraße eingestellt. Dies geschieht immer zugunabhängig, d. h. jeder Zug bekommt die zuvor projektierte Fahrstraße eingestellt. Das Zuglenkverfahren mit einer Lenkziffer benutzt eine zusätzliche Ziffer, die der Zugnummer angehängt wird. So sind bis zu 10 mögliche Richtungen definierbar, so daß z. B. an Abzweigstellen die korrekte Fahrstraße für den jeweiligen Zug eingestellt werden kann. Zum Einsatz kommt dieses Verfahren beispielsweise bei der Münchener S-Bahn.

Im Gegensatz zu den bisher verwendeten Verfahren wird in der BZ eine fahrplanbasierte Zuglenkung realisiert [11]. Hierzu sind im ZLS 901 zugbezogene Einstellmöglichkeiten für die Fahrstraßen vorhanden. Hierbei können die Fahrstraßen für jeden einzelnen Zug definiert werden. In einer Gleisbenutzungstabelle, auch Zuglenkplan genannt, sind die einzustellenden Fahrstraßen ab den entsprechenden Zuglenkungssignalen (ZL-Signal) für alle Züge eingetragen.

Das Zuglenksystem prüft an den sogenannten Operationsanstoßpunkten für ein Signal die projektierten Lenkvorgaben. Zunächst wird dabei in der Gleisbenutzungstabelle überprüft, ob die betreffende Zugnummer enthalten ist. Nach Feststellen der einzustellenden Fahrstraße erfolgt eine Stellbarkeitsprüfung. Hierbei wird beispielsweise geprüft, ob alle Elemente der Fahrstraße verfügbar sind. Ist ein Element der

Fahrstraße nicht verfügbar, können automatisch Alternativfahrwege getestet werden, falls solche projektiert worden sind. Erst nach diesen Prüfungen wird ein Fahrstraßeneinstellkommando für das Stellwerk generiert und zur Ausführung an das Stellwerk übergeben. Der Stellversuch wird vom Lenksystem überwacht, d. h. es wird auf eine positive Quittung des Stellwerks gewartet, und gegebenenfalls eine neue Bearbeitung angestoßen. Die Sicherheitsverantwortung liegt dabei weiterhin beim Stellwerk, d. h. die Zuglenkung muß nicht signaltechnisch sicher sein. Ein Fahrstraßeneinstellkommando der Zuglenkung würde von dem Stellwerk abgewiesen, wenn die Fahrstraße nicht einstellbar ist [80].

Die Gleisbenutzungstabelle wird mit der Übernahme eines neuen Tagesfahrplans mit den notwendigen Daten gefüllt. Hierin sind die für jeden Zug in den jeweiligen Betriebsstellen einzustellenden Fahrstraßen vermerkt. Der Zuglenker kann die Gleisbenutzungstabelle für dispositive Eingriffe noch bis kurz vor der Ausführung ändern, um zum Beispiel einen Zug in ein anderes Gleis umzuleiten. Die Zuglenkung kann signal- oder auch bereichsweise ein- und ausgeschaltet werden. Der Zuglenker hat auch die Möglichkeit, einen Dispo-Halt für ein ZL-Signal einzugeben. Dann wird die Zuglenkung für dieses Signal temporär deaktiviert. Der Dispo-Halt kann hierbei auch zugbezogen definiert werden; dann wird die Zuglenkung nur für diesen einen Zug deaktiviert. Für den Zug wird dann automatisch keine Fahrstraße eingestellt; der Zuglenker muß entweder eine Fahrstraße selber einstellen oder den Dispo-Halt wieder löschen. Für dispositive Zwecke kann der Zuglenker außerdem Reihenfolgebedingungen eingeben, so daß beispielsweise bei einer Überholung der überholende Zug auch vor dem überholten Zug auf die Strecke fährt. Eine solche Reihenfolgebedingung ist zeitunabhängig, d. h. auch wenn der überholende Zug verspätet ist, wird auf Überholung gewartet. Falls die Überholung nicht stattfinden soll, weil der überholende Zug sehr verspätet ist, muß der Zuglenker eingreifen und diese Reihenfolgebedingung löschen.

Bisher ist die Zuglenkung eine stellwerksinterne Möglichkeit, Fahrstraßen nach Vorgaben zeitgerecht einstellen zu können. Nach Anschluß des ZLS 901 an ein zentrales Dispositionssystem, kann die Zuglenkung auch in der Betriebszentrale genutzt werden. Der Zuglenker in der BZ kann direkt die Gleisbenutzungstabelle ändern und besitzt damit den steuernden Durchgriff auf die Stellwerke. Dann ist es nicht mehr erforderlich, daß der Zuglenker dem Fahrdienstleiter Weisungen erteilen muß. Die Entscheidungen des Zuglenkers können auch noch recht kurzfristig in die Gleisbenutzungstabelle eingetragen werden, im Prinzip noch bis kurz vor dem Operationsanstoßpunkt für die Fahrstraße. In der Betriebsabwicklung ist dies als großer Fortschritt im Hinblick auf eine effiziente Betriebsführung zu sehen.

Zum ersten Mal wurde die ZLS 901 in der Betriebszentrale Magdeburg eingesetzt. Im Hinblick auf den Einsatz in den neuen BZ mit größeren Stellbezirken werden noch weitere Funktionen nachgerüstet. So sollen in Zukunft beispielsweise auch zugfahrtbegleitende Rangierfahrstraßen eingestellt werden können [80]. Mit diesen Erweiterungen ist dann eine noch weitreichendere Unterstützung des özF möglich, als dies heute der Fall ist. Denn zum Bereitstellen und Abstellen der Züge sind häufig viele Rangierbewegungen notwendig, die bislang vom özF manuell eingestellt werden müssen. Durch solche zukünftigen Entwicklungen sind in dem oben beschriebenen Betriebszentralenkonzept noch weitere Rationalisierungspotentiale enthalten.

Die neueste Entwicklung stellt die Zuglenkung ZL L2000 dar, welche von Alcatel für das Betriebszentralenkonzept entwickelt worden ist [73]. Die wesentliche funktionale Sicht entspricht weitgehend dem oben beschriebenen ZLS 901.

3.4.4 Dispositionssysteme der BZ

In diesem Abschnitt sollen die wesentlichen Dispositionssysteme der BZ und die Beziehungen untereinander dargestellt und erläutert werden. Der zentrale Modul in der BZ ist das System LeiDis-S/K (Leitsystem der Betriebsführung Strecken- und Knotendisposition [21]). Grundlage hierfür ist das System der Rechnerunterstützten Zugüberwachung sowie der Rechnerunterstützten Betriebsleitung [25].

In Abb. 10 sind die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Systemen in der Betriebszentrale graphisch dargestellt. Zur Verdeutlichung sind hier nochmals die verwendeten Abkürzungen aufgeführt:

- LeiDa-S Leitsystem Zentrale Datenhaltung – Systemdaten
- LeiDa-F Leitsystem Zentrale Datenhaltung – Fahrplanbearbeitung
- LeiDis-S/K Leitsystem Streckendisposition / Knotendisposition
- LeiBIT Leitsystem Betriebliche Informationsverteilung
- ZL Zuglenkung
- ZN Zugnummernmeldeanlage

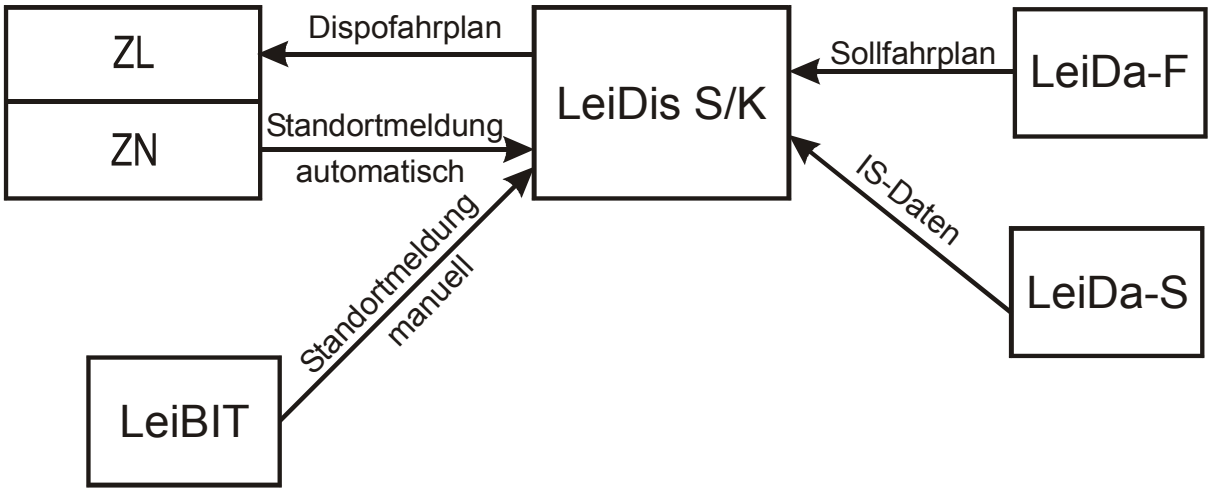

Abb. 10: Leitsysteme der Betriebsführung

LeiDis-S/K erhält seine Informationen über die Infrastruktur und den Fahrplan aus den Systemen LeiDa-F (Leitsystem der Betriebsführung Zentrale Datenhaltung – Fahrplanbearbeitung [18]) und LeiDa-S (Leitsystem der Betriebsführung Zentrale Datenhaltung – Systemdaten [19]). Aktuelle Zuglaufmeldungen werden vom Zugnummernmeldesystem bzw., wenn dieses nicht vorhanden ist, aus LeiBIT (Leitsystem Betriebliche Informationsverteilung) übernommen. LeiDis-S/K erzeugt Dispositionsfahrpläne, die mit Hilfe der Zuglenkung Daten über die einzustellenden Fahrwege an die Stellwerke übermittelt.

3.4.4.1 Leitsystem Streckendisposition / Knotendisposition

Das Leitsystem der Betriebsführung für die Strecken- und Knotendisposition LeiDis-S/K ist das dispositive Kernsystem der BZ. LeiDis-S/K wird mit Daten aus den Systemen LeiDa-S (Infrastrukturdaten, …) und LeiDa-F (Fahrplandaten) versorgt. Diese werden aus den Systemen des Trassenmanagements (DAVIT, RUT) über Schnittstellen übernommen. Kurzfristige Sonderzüge können unmittelbar in LeiDis-S/K über einen Fahrplandialog eingegeben werden. Nach einer Aufbereitung und Konsistenzprüfung stehen diese Daten den Disponenten zur Verfügung. Der Disponent kann dann zwischen verschiedenen Bildschirmdarstellungen (Zeit-Weg-Linien, Streckenspiegel, …) wählen, um diese Daten zu visualisieren.

Weiterhin erhält das System LeiDis-S/K die Zuglaufmeldungen über Zugnummernmeldeanlagen oder aus LeiBIT. Mit Hilfe dieser aktuellen Daten kann in LeiDis-S/K ein Soll-Ist-Vergleich stattfinden. Während in den SSP-Darstellungen immer nur die aktuellen Daten angezeigt werden, kann der Disponent bei der ZWL-Darstellung auch die Abweichungen zwischen dem Ist- und dem Sollfahrplan erkennen.

Auch können aktuelle Gleissperrungen, die durch die Fahrdienstleiter eingegeben werden, nach LeiDis-S/K übernommen und im Streckenspiegel angezeigt werden. Diese werden zusätzlich zu denen vom Disponenten direkt in das System eingegebenen Gleissperrungen dargestellt [28].

Eine wesentliche Erweiterung gegenüber der RZü ist die Konflikterkennung und -lösung. Bisher mußten die Disponenten die Konflikte anhand der Zeit-Weg-Linien erkennen. Dieses nur recht ungenaue Erkennen von Konflikten wird nun in LeiDis-S/K automatisiert. Die Konflikterkennung ermittelt Gleisbelegungskonflikte, Zugfolgekonflikte sowie Konflikte durch Strecken- und Gleissperrungen [28]. Die erkannten Konflikte werden dann in den Darstellungen für die Disponenten visualisiert. Des weiteren wird in der Endstufe der BZ eine Konfliktlösung realisiert. Hierzu werden dem Disponenten Konfliktlösungsvorschläge unterbreitet. Eine detaillierte Beschreibung der Konflikterkennung und -lösung in der BZ ist im Abschnitt 4.5 zu finden.

3.4.4.2 Leitsystem Zentrale Datenhaltung LeiDa-S

Das Leitsystem der Betriebsführung Zentrale Datenhaltung – Systemdaten (LeiDa-S) stellt das Grundgerüst der Datenhaltung dar. Diese „Zentrale Datenhaltung“ ist für die Verwaltung und die Verteilung der Daten für den gesamten Bereich der Betriebszentrale verantwortlich. Mit Hilfe von Datenmanagementfunktionen werden die Datenintegrität und die Datenkonsistenz aller zentral abgelegten Datenbestände gewährleistet. Außerdem koordinieren sie den Datenaustausch mit übergeordneten und benachbarten DV-Systemen [4].

Das Datenmodell hat den folgenden Umfang [19]:

- Stammdaten: Grunddaten, die sich selten ändern und für alle BZ-Standorte identisch sind, z. B. Triebfahrzeugdaten, Verkehrstageschlüssel, Zuggattungen, …
- Infrastrukturdaten: Betriebsstellen, Gleise, Weichen und Signale, …
- Betriebsplandaten: beschreiben den betrieblichen Ablauf, z. B. Wartezeitvorschrift, Bahnhofsfahrordnung, …
- Konfigurationsdaten: Grunddaten für die lokalen Gegebenheiten der BZ, z. B. Überwachungsbereiche, Verteilerangaben für zentrale Datenbestände, …
- Produktionsdaten: alle Daten, die für den Betriebsablauf an einem Tag erforderlich sind, z. B. Tagesfahrplan, Zuglaufmeldungen, Fahrwegzustand, Verfügbarkeit der Anlagen, …

- Organisationsdaten: dienen der betrieblichen Verwaltung, z. B. Arbeitsplatz- bzw. Bedienprofile, …
- Systemdaten: Software- und Hardwarekonfiguration, Netzwerkinfrastruktur, …

Die Datenbestände unterliegen einer Versionsverwaltung, so daß auch mehrere Versionen von Daten in der zentralen Datenhaltung gespeichert werden können. Dies ist beispielsweise bei Infrastrukturänderungen erforderlich, die an einen bestimmten Tag gültig werden. Hierbei ist es erforderlich, daß die neuen Daten übernommen und auf Konsistenz geprüft werden können, ohne die derzeit aktuellen Daten zu beeinflussen. An dem zuvor festgelegten Tag können dann die neuen Infrastrukturdaten gültig geschaltet werden, so daß diese dann zur Verfügung stehen.

3.4.4.3 Leitsystem Zentrale Datenhaltung LeiDa-F

Das Leitsystem der Betriebsführung Zentrale Datenhaltung – Fahrplanbearbeitung (LeiDa-F) realisiert die betrieblichen Anforderungen an die Fahrplanbearbeitung bei den betriebsleitenden Stellen. Mit diesem System können Fahrpläne neu konstruiert bzw. bestehende verändert werden. Bei LeiDa-F handelt es sich um ein System für die dispositive Fahrplanbearbeitung, die nicht mit den Fahrplankonstruktionssystemen des Trassenmanagements zu verwechseln sind.

Für die dispositive Fahrplanbearbeitung sind in LeiDa-F die folgenden Funktionalitäten vorhanden [18]:

- kurzfristige Aktivierung von Bedarfsfahrplänen
- Ausfall/Teilausfall von Zügen
- Fahrplanerstellung für kurzfristig durch die BZ einzulegende Sonderzüge

LeiDa-F verfügt über Eingabefunktionen zur Erfassung von Fahrplankonstruktionsdaten. Für die Fahrzeitrechnung und Konfliktermittlung greift LeiDa-F auf die Funktionalitäten von LeiDis-S/K zurück. Die Korrektur bzw. Ergänzung des Tagesfahrplans durch LeiDa-F wird dann nach LeiDa-S übergeben, wodurch dann die BZ-interne Verteilung des aktualisierten Fahrplans vorgenommen wird.

3.4.4.4 Leitsystem Betriebliche Informationsverteilung LeiBIT

Das Leitsystem Betriebliche Informationsverteilung LeiBIT ist auf eine Pilotanwendung des „Rechnerunterstützten Betriebsmeldeverfahrens (RBmv)“ zurückzuführen.

Diese Pilotanlage ist seit Dezember 1994 mit Erfolg in Betrieb [33]. LeiBIT hat die Aufgabe, den Informationsfluß zwischen der Betriebszentrale und den Mitarbeitern vor Ort zu gewährleisten. Als System der DB Netz AG dient LeiBIT sowohl der internen als auch der externen Informationsverteilung. Zu den externen gehören neben den benachbarten (inländischen und ausländischen) Infrastrukturbetreibern auch die Kunden der DB Netz AG, z. B. Eisenbahnverkehrsunternehmen.

Nach Integration von LeiBIT in die Betriebszentralen besteht eine der Aufgaben darin, die betrieblichen Informationen, die in den Betriebszentralen eintreffen, auch den Mitarbeitern vor Ort, insbesondere dem Stellwerkspersonal, zur Verfügung zu stellen. Weiterhin ist der Informationsfluß von den Fahrdienstleitern zu den Disponenten in der BZ durch LeiBIT gewährleistet. Falls aufgrund älterer Sicherungstechnik keine automatischen Zuglaufmeldungen über den ZLV-Bus an die Betriebszentrale gesendet werden können, verwenden die Fahrdienstleiter das System LeiBIT, um diese Zuglaufinformationen zu übermitteln. Hierbei wird dann das vormals verwendete Verfahren der fernmündlichen Übertragung abgeschafft. Diese manuell erstellten Zuglaufinformationen aus LeiBIT stehen dann genauso wie die automatisch erzeugten Meldungen dem System LeiDis-S/K zur Verfügung. Der Disponent in der BZ hat diese Meldungen direkt in seinem Dispositionssystem und braucht sie nicht mehr fernmündlich in Empfang zu nehmen. LeiBIT übernimmt auch den Informationsfluß vom Disponenten zu den Fahrdienstleitern, in dem die in der BZ getroffenen dispositiven Entscheidungen zu den Stellwerken vor Ort übermittelt werden. Dies ist vor allem bei älterer Stellwerkstechnik notwendig, die nicht von der BZ aus ferngesteuert werden können.

Die Planungen für die BZ sehen vor, daß die Disponenten und Fahrdienstleiter zentral den Betrieb regeln und steuern. Im Netz der DB existieren noch zahlreiche Stellwerke, die nicht ferngesteuert (beispielsweise mechanische und ältere Relaisstellwerke) und auch aus Kostengründen nicht alle durch neue Elektronische Stellwerke ersetzt werden können. Hier werden nach wie vor Fahrdienstleiter vor Ort sein müssen, die wie bisher mit den Disponenten fernmündlich kommunizieren. Das System LeiBIT ersetzt diese Kommunikation auf elektronischem Weg, so daß die Fahrdienstleiter und Disponenten nicht mehr direkt miteinander sprechen müssen. Dies sorgt zum einen für eine Entlastung der Disponenten in den Betriebszentralen, da die Zuglaufmeldungen direkt in das Dispositionssystem übernommen werden und zum anderen bei den Fahrdienstleitern, die die Zuglaufmeldungen und Verspätungsbegründungen nicht mehr telefonisch mitteilen müssen, sondern jederzeit in ihre Rechner eingeben können.

Weiterhin erhalten die Fahrdienstleiter vor Ort unmittelbar die Verspätungsmitteilungen aus der BZ, sobald diese Daten in der BZ bekannt sind. Sie müssen nicht mehr fernmündlich über die Zugverspätungen aus der BZ in Kenntnis gesetzt werden. Eine Funktion von LeiBIT ist eine tabellarische Auflistung der Zugfahrten einer Betriebsstelle, die sortiert nach den Fahrplanzeiten die Zugnummer, die aktuelle Relativlage des Zuges (Abweichung von der planmäßigen Abfahrtszeit), die Gleisnummer sowie den aktuellen Zugstandort und gegebenenfalls die Verspätungsursache enthält. So sind alle am Betrieb beteiligten Personen jederzeit über das aktuelle Betriebsgeschehen informiert.

In Zukunft sollen auch die aktuellen Zugbildungsinformationen bereitgestellt werden. Beispielsweise könnten dann Lokbaureihe, Last und Länge, vorhandene Bremshundertstel usw. für jeden Zug zeitnah für die Disposition zur Verfügung stehen. Diese aktualisierten Zugdaten sind für eine gute Disposition unerläßlich, denn die Abweichungen der aktuellen von den planmäßigen Zugdaten können erhebliche Einflüsse auf die Fahrzeitrechnung haben. Hierzu ist jedoch ein Datenaustausch mit den Eisenbahnverkehrsunternehmen zu realisieren, da diese Daten nicht von der DB Netz stammen.

Insgesamt sollen deutschlandweit ca. 1800 Ein- und Ausgabestationen im Rahmen von LeiBIT neu aufgestellt und weitere 200 Rechner mit der LeiBIT-Software ausgerüstet werden [33].

3.4.5 Systemanforderungen

Damit der Eisenbahnbetrieb durch die Betriebszentralen zuverlässig gesteuert und disponiert werden kann, sind an die Hard- und Softwaresysteme in der BZ harte Anforderungen geknüpft. So muß beispielsweise die Verfügbarkeit der BZ bei 99,5 % liegen [50]. Bei einem 24-Stunden-Betrieb entspricht dies einer durchschnittlichen Ausfallzeit von maximal sieben Minuten pro Tag. Dies hat zur Folge, daß die Hardwaresysteme grundsätzlich alle doppelt vorhanden sind. Dann kann bei Ausfall eines Systems automatisch auf das zweite umgeschaltet werden. Diese Redundanz reicht von den Rechnern, die die einzelnen Graphiken aufbereiten, bis zur Stromversorgung. Damit auch bei einem Stromausfall die BZ ihren Betrieb nicht einstellen muß, sind alle Systeme über Akkumulatoren gepuffert, und bei einem längeren Ausfall steht ein Notstromaggregat zur Verfügung.

Auch die Reaktionszeitanforderungen an die Systeme der BZ sind in den Lastenheften verankert. So sind für LeiDa-F Antwortzeiten vorgegeben, die eingehalten wer-

den müssen, beispielsweise für die Funktion „vorhandene Fahrpläne ansehen“ zwei Sekunden oder „Fahrplankonstruktion im eigenen BZ-Bereich“ 30 Sekunden [19]).

Die Systeme der BZ Frankfurt müssen ca. 150.000 – 180.000 Zuglaufmeldungen täglich verarbeiten. Als Spitzenwert sind in der BZ Duisburg ca. 6.000 Zuglaufmeldungen pro Minute zu bearbeiten. Dadurch sind sehr hohe Anforderungen an die Rechnersysteme gestellt.

3.4.6 Vorteile der BZ

Durch Einführung des Konzepts der BZ bei der DB Netz AG wird nicht nur ein Rationalisierungspotential sondern auch eine Erhöhung der Betriebsqualität erzielt werden. Im Endausbau der BZ wird der steuernde Durchgriff des Zuglenkers auf die angeschlossenen Stellwerke realisiert. Hierzu werden die ESTW und die RSTW (über Anpassungsschaltungen) an die BZ angeschlossen. Der Durchgriff des Disponenten erfolgt über die Zuglenkung. Durch diese Fernsteuerung ist es möglich, den Arbeitsplatz des Fahrdienstleiters und des Disponenten in einem Arbeitsplatz zusammenzufassen. Der Zuglenker wird dann durch die Rechnertechnik unterstützt, z. B. wird auch heute schon ein Zuglenkrechner eingesetzt, der in den Stellwerken die Regelfahrstraßen für die Züge einstellt, so daß der Fahrdienstleiter/Zuglenker nur im Störungsfall selber Fahrstraßen einstellen muß.

Es ergibt sich ein Rationalisierungspotential durch Personaleinsparung, als Beispiel sei hier der BZ-Vorläufer Hagenow-Land genannt. Die Ausrüstung der Strecke Hamburg – Berlin mit ESTW führte zu einer Auflassung von 82 besetzten Betriebsstellen (Fahrdienstleiter, Weichenwärter, BÜ-Wärter). Dadurch war es möglich, ca. 300 Personale einzusparen [60]. Diese hohe Einsparung ist in erster Linie auf die Einführung der Elektronischen Stellwerke zurückzuführen. Ein Teil dieser Personaleinsparung ist aber auch auf die Integration der ESTW in eine zentrale BZ zurückzuführen.

Der zweite wichtige Vorteil einer BZ ist die angestrebte Erhöhung der Betriebsqualität. Durch den Einsatz von moderner Rechnertechnik sollen die Disponenten bei ihren Entscheidungen weitreichend unterstützt werden. Mit der quasi-kontinuierlichen Zuglaufverfolgung ist die Grundlage für Dispositionsentscheidungen deutlich genauer geworden [63]. Das Erkennen der Konflikte war bislang in den RZü-Zentralen nur anhand der Zeit-Weg-Linien der Züge möglich. Dies wird in den BZ durch Anzeige der Sperrzeitentreppen deutlich verbessert. Weiterhin soll die Konflikterkennung rechnerunterstützt erfolgen, d. h. der Disponent wird auf die sich anbahnenden Konflikte aufmerksam gemacht. Schließlich soll das System auch für die Konfliktlösung eine Rechnerunterstützung bieten, die den Disponenten Konfliktlösungen vorschlägt.

Wenn im Endausbau der BZ der steuernde Durchgriff auf die Stellwerke möglich ist, können die Entscheidungen des Disponenten direkt und kurzfristig umgesetzt werden. Durch diese direkte Eingriffsmöglichkeit kann auf kurzfristige Störungen schneller als bisher reagiert werden.

Neben dem Durchgriff auf die Stellwerke ist es in vielen Fällen sinnvoll, den Zügen Fahrempfehlungen zu geben. Beispielsweise kann einem im Zulauf auf einen größeren Knoten befindlichen Zug eine Geschwindigkeitsempfehlung gegeben werden, so daß unnötige Halte vermieden werden. Eine direkte Datenübertragung von Fahrempfehlungen in die Züge ist heute mit der Linienzugbeeinflussung (LZB) problemlos möglich. Zukünftig können Geschwindigkeiten auch auf Züge übermittelt werden, die mit moderner Sicherungstechnik (ETCS oder FFB) ausgestattet sind [63].

3.4.7 Zeitliche Entwicklung der BZ

Das Konzept der Betriebszentrale wurde zum ersten Mal in Magdeburg eingesetzt. Die im Dezember 1995 in einer ersten Ausbaustufe in Betrieb genommene Anlage der BZ Magdeburg stellt die Pilotanwendung dar. Hierbei werden erstmals die Bedienebenen der Steuerungs- und Dispositionssysteme örtlich konzentriert. Durch eine Integration der Systeme ist die Vorraussetzung für die angestrebte durchgängige Bedienung und den Durchgriff der Disposition auf die Steuerung geschaffen. Der Stellbereich der BZ Magdeburg reicht über die integrierten Elektronischen Stellwerke von Werder bis Biederitz (ca. 100 km) auf der Strecke von Hannover nach Berlin. Das für die BZ neu entwickelte Bedienplatzsystem BPS 901 von Siemens kommt erstmalig zum Einsatz. In die BZ ist außerdem das operative Automatisierungssystem der Zuglenkung (ZLS 901) integriert. Dadurch können die Fahrdienstleiter von regelmäßig wiederkehrenden Tätigkeiten (Einstellen von Regelzugfahrstraßen, …) entlastet werden [36].

Nach dem Vorlaufbetrieb der BZ Magdeburg wurde im Sommer 1998 der Auftrag zur Umsetzung des Konzepts der Betriebszentralen von der Deutschen Bahn AG an das Konsortium BZ 2000 erteilt. Zu diesem Firmen-Konsortium gehören die Firmen Alcatel, Siemens AG und Vossloh System-Technik VST, die bisher die Systeme für die Fahrwegsicherung und Betriebsführung (ESTW, RZü, …) bei der DB entwickelt haben. Der Aufbau der BZ erfolgt in drei Stufen. Die Grundstufe ist eine Umsetzung der neuen RZü-Software auf die neue Hardware Umgebung. Weiterhin wird jeweils von einem Standort der Überwachungsbereich auf die gesamte Niederlassung erweitert und die Zugüberwachung um eine Konflikterkennung ergänzt. In der ersten Erweiterungsstufe erfolgt die Umsetzung der zentralen Datenhaltung, so daß eine manuelle

Nachbearbeitung der Daten in der BZ nicht mehr erforderlich ist. Weiterhin wird die Konflikterkennung sowie der steuernde Durchgriff (für manuelle Änderungen am Dispositionsfahrplan und direkte Bedienungen) aus der BZ auf die Stellwerke realisiert. Schließlich soll in der zweiten Erweiterungsstufe die BZ dann ihren vollen Leistungsumfang erreichen. Hierin ist die automatische Konfliktlösung und deren Umsetzung in Stellbefehle der ESTW über die Zuglenkung enthalten. Damit ist dann die volle Integration von Disposition und Operation an einem Arbeitsplatz geschaffen [25].

Als Pilotanwendung für das neue Konzept wurde die BZ Frankfurt ausgewählt, wo die Grundstufe im Mai 1999 in Betrieb genommen wurde. Mit der BZ München stehen der DB Netz AG ab Ende 2001 alle sieben BZ an den Standorten Berlin, Leipzig, Hannover, Duisburg, Frankfurt, Karlsruhe und München zur Verfügung.

3.5 Netzleitzentrale

Die einzelnen Rechnerunterstützten Zugüberwachungen bzw. die neu eingerichteten Betriebszentralen disponieren die Züge jeweils in ihrem Zuständigkeitsbereich. Bei überregional verkehrenden Zügen ist nicht nur eine Kommunikation zwischen den sieben Betriebszentralen erforderlich sondern vielmehr eine übergeordnete Zentrale, die netzweit das Betriebsgeschehen überwacht. Für diese Aufgabe wurde im Juli 1997 die Netzleitzentrale (NLZ) in Frankfurt in Betrieb genommen. Die benötigten Daten der Zuglaufverfolgung werden dann von den einzelnen Betriebszentralen geliefert. Hierbei wird durch eine Filterung der Daten erreicht, daß nur die Zuglaufmeldungen die NLZ erreichen, die von den überregionalen Zügen stammen. Dies betrifft sowohl die Züge des Personenverkehrs (ICE, IC, IR, …) als auch höherwertige Züge des Güterverkehrs. In der Regel werden die anderen Züge, z. B. alle Regionalzüge nicht an die NLZ weitergereicht. Diese Filter können jedoch bei Bedarf angepaßt werden, so daß beispielsweise bei einem Großereignis auch die Daten der Regionalzüge an die NLZ übermittelt werden können.

Die Disponenten in der Netzleitzentrale sind aufgrund der zur Verfügung gestellten Daten in der Lage, die Züge im gesamten Netz der DB zu disponieren. Dies ist insbesondere für Anschlüsse wichtig, wenn z. B. ein ICE durch mehrere BZ-Bereiche fährt und die Disponenten in der BZ Berlin, in der der ICE eine Verspätung erleidet, keine Angaben über die möglichen Anschlüsse in der BZ Frankfurt haben. Dann können die Disponenten in der NLZ bereits frühzeitig erkennen, welche Verspätung der ICE in Frankfurt voraussichtlich haben wird und welche Anschlüsse erreicht oder nicht erreicht werden. In diesen Fällen geben die Disponenten der NLZ entsprechen-

de Anweisungen an die betreffende BZ, welche Anschlüsse gehalten werden sollen und welche nicht.

Um ihre Dispositionsentscheidungen treffen zu können, haben die Disponenten in der NLZ die Möglichkeit, sich die Bilder aus den einzelnen BZ auf ihren Bildschirmen anzeigen zu lassen. Dies sind die aus dem System LeiDis-S/K (Leitsystem Disposition Strecke/Knoten) stammenden Zeit-Weg-Linien-Bilder sowie die Streckenspiegel. Neben diesen sind noch weitere Bilder aus dem speziell für die NLZ entwickelten System LeiDis-N (Leitsystem Disposition Netz, [20]) abrufbar.

3.5.1 Graphische Streckenübersicht

Aus LeiDis-N stammt das Bild der Graphischen Streckenübersicht (GSU). Diese Ansicht ist das Standardarbeitsmittel für Disponenten mit netzweiten Funktionen. Hierbei werden alle Züge mit ihrem aktuellen Standort in einer Karte dargestellt. Es können zusätzlich Anschlußbindungen sowie die Verspätungslagen angezeigt werden. In der GSU können auch nur spezielle Züge herausgefiltert werden, beispielsweise kann ein Verspätungsfilter gesetzt werden, so daß nur noch alle Züge angezeigt werden, die eine größere als eine vorgegebene Verspätung besitzen. Der Disponent hat die Möglichkeit in der den gesamten Bereich der DB Netz AG abdeckenden Karte einen beliebigen Bildausschnitt zu wählen und diesen zu vergrößern bzw. zu verkleinern. Auch können die bereits erwähnten Filter individuell konfiguriert und nach Bedarf angepaßt werden. Eine Bildschirmabbildung ist beispielsweise in [51] zu finden.

3.5.2 Knotenübersicht

Ein für die Anschlußbeziehungen wichtiges Dispositionshilfsmittel ist die Knotenübersicht oder Anschlußgraphik. Wie der Name Anschlußgraphik schon ausdrückt, werden hierbei die Anschlüsse aller Züge in einem Knoten graphisch dargestellt (siehe Abb. 11). Auf der linken Seite sind die im Knoten eintreffenden Züge und auf der rechten Seite die den Knoten verlassenden Züge dargestellt. Die Züge werden gemäß ihrer tatsächlichen Fahrplanlage angezeigt. Die Zahl hinter der Nummer des Zuges gibt die Differenz zwischen der tatsächlichen und der fahrplanmäßigen Ankunft- bzw. Abfahrtszeit an. In Abb. 11 kommt Zug IC 755 in Frankfurt Hbf um 14:10 Uhr mit sieben Minuten Verspätung an und wird um 14:15 Uhr wieder abfahren. Die Anschlußverknüpfungen der Züge werden durch die Linien zwischen den ankommenden und den abfahrenden Zügen dargestellt. Die durchgezogenen (in der farbigen Monitordarstellung grünen) Linien kennzeichnen hierbei Anschlüsse, die auf-

grund der aktuellen Betriebssituation gehalten werden; (rot) gestrichelt sind die Anschlüsse dargestellt, die aufgrund von Verspätungen nicht erreicht werden.

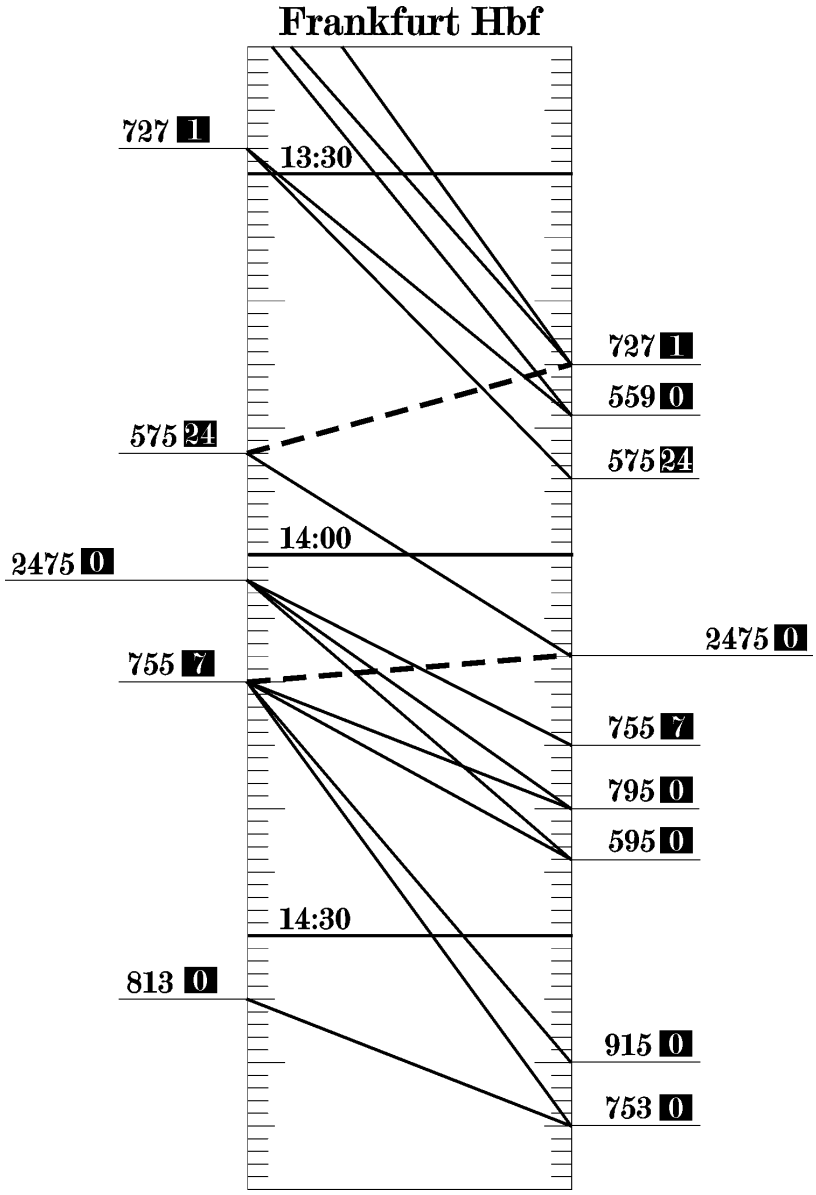

Abb. 11: Knotenübersicht (Anschlußgraphik)

Der IC 755 hat planmäßig fünf Anschlüsse zu erreichen. Die rot-gestrichelte Linie zu IR 2475 zeigt an, daß dieser Anschluß nicht erreicht wird, da IC 755 mit sieben Minuten Verspätung erst um 14:10 Uhr ankommt, IR 2475 jedoch schon planmäßig um 14:08 Uhr abfährt. Die übrigen Anschlußzüge des IC 755 sind in grün dargestellt, werden also erreicht. Der Disponent muß nun entscheiden, wie auf diesen Anschlußverlust zu reagieren ist. Falls er den Anschluß als wichtig einstuft, muß der IR 2475 den Anschluß abwarten und erhält damit eine Haltezeitverlängerung, die so bemessen sein muß, daß die Reisenden auch mit einem gegebenenfalls erforderlichen Bahnsteigwechsel den Anschlußzug noch erreichen. Wenn für die Reisenden ein

anderer adäquater Anschlußzug existiert, kann er den Anschluß aufgeben und die Reisenden auf den späteren Anschlußzug verweisen.

Die Anschlußbeziehungen werden dabei jedoch nicht aus den Systemen des Trassenmanagements übernommen, sondern in den einzelnen Betriebszentralen wird festgelegt, zwischen welchen Zügen eine Anschlußbeziehung besteht. Diese in den Betriebszentralen erzeugten Anschlüsse werden dann für die Darstellung in der Knotenübersicht der Netzleitzentrale aufbereitet. In der Netzleitzentrale werden täglich ca. 4.000 Anschlüsse zwischen den Fernverkehrszügen überwacht und disponiert.

3.5.3 Bahnhofsfahrordnung

In der Bahnhofsfahrordnung (BFO) wird die zeitliche Belegung der einzelnen Gleise in den Knotenbahnhöfen graphisch dargestellt. Hieraus kann der Disponent entnehmen, welches Gleis zu welchem Zeitpunkt durch welchen Zug belegt ist. So muß beispielsweise für einen verspäteten Zug ein anderes Gleis verwendet werden, da das im Fahrplan vorgegebene zu der verspäteten Zeit schon durch einen anderen Zug belegt ist. Für die Disposition von Anschlüssen ist die BFO ein wichtiges Hilfsmittel. Denn für die Übergangszeit zwischen zwei Zügen macht es einen erheblichen Unterschied, ob die beiden Züge am gleichen Bahnsteig gegenüber stehen, oder ob die Reisenden noch über Treppen auf einen weit entfernt liegenden Bahnsteig gehen müssen. Ihre erste Anwendung fand die graphische Anzeige der tagesaktuellen BFO als Bahnhofsfahrordnungssystem BFS 900 im ESTW Hannover ab 1996.

3.6 Betriebsleitsysteme im Ausland

Die umfangreiche Rechnerunterstützung bei der Betriebsleittechnik hat auch in vielen ausländischen Bahnen Einzug gehalten. Stellvertretend für diese Systeme zur Betriebsleittechnik werden in diesem Abschnitt die Systeme der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) sowie der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) kurz vorgestellt und erläutert.

3.6.1 Österreichische Bundesbahnen (ÖBB)

Die Zugüberwachung in Österreich fand ihren Anfang im Jahr 1956 durch Inbetriebnahme der Zü Linz. Bis Mitte der 60er Jahre wurde das Netz der mit einer Zugüberwachung ausgestatteten Strecken auf weitere Hauptstrecken ausgedehnt. Der wachsende Eisenbahnverkehr und die höheren Anforderungen führten ab 1978 zur Einrichtung von Zugüberwachungen an den einzelnen Bundesbahndirektionsstandorten.

Im Oktober 1983 wurde auf der Tauernbahn zwischen Schwarzach/St. Veit und Villach die erste RZü der ÖBB in Betrieb genommen. In den 90er Jahren wurden die vier RZü-Zentralen in Wien, Linz, Innsbruck und Villach aufgebaut. Sie deckten alle Hauptstrecken und die wichtigen Querverbindungen im Netz der ÖBB ab [2].

Die Ausrüstung der Rechnerunterstützten Zugüberwachung in Österreich erfolgte durch SEL Alcatel Austria aus dem Alcatel Konzern, die auch in Deutschland einige RZü ausgerüstet hat. Die technische Ausstattung der RZü in Österreich entspricht im wesentlichen den im Abschnitt 3.3 erläuterten RZü in Deutschland. Unterschiede gibt es beispielsweise in der Datengewinnung der Zuglaufmeldungen. Anders als in Deutschland ist in Österreich jeder Bahnhof mit einem Bahnhofsrechner ausgerüstet, der die Stellwerksdaten (Zugnummernfortschaltung und Fahrstraßeneinstellung) abgreift und auch Benutzereingaben verarbeitet. Alle Daten werden dann über Datenleitungen an die übrigen Bahnhofsrechner sowie den Zentralrechner in der RZü-Zentrale weitergegeben.

Die Funktionalität entspricht dabei der bei der Deutschen Bahn eingesetzten Rechnerunterstützten Zugüberwachung, d. h. die Disponenten verfügen über die Zeit-Weg-Linien-Darstellungen (siehe Abschnitt 3.3.1) und Streckenspiegel-Darstellung (siehe Abschnitt 3.3.2). Die Umsetzung der dispositiven Entscheidungen geschieht analog zu der RZü der Deutschen Bahn.

3.6.2 Schweizerische Bundesbahnen (SBB)

Bei den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) erfolgte die Steuerung der Anlagen und die Zuglaufverfolgung zunächst lokal in den Stellwerken vor Ort. Auch in der Schweiz wurde es durch weiter zunehmenden Verkehr immer wichtiger, den Zugverkehr von zentralen Stellen aus über große Entfernungen zu überwachen und zu disponieren, so daß eine gute Leistungsqualität und hohe Fahrplanstabilität, auch bei Behinderungen, erreicht werden können [109].

Die erste Rechnerunterstützte Zugüberwachung der SBB wurde Ende der 80er Jahre in Zürich in Betrieb genommen. Die RZü Zürich stammt von der DST in Kiel, die auch die ersten RZü der damaligen Deutschen Bundesbahn aufgebaut hat. Aus diesem Grunde entspricht die Funktionalität der RZü Zürich den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Rechnerunterstützten Zugüberwachungen der Deutschen Bahn.

Mitte der 90er Jahre entschied sich die SBB, ein neues System für die Rechnerunterstützte Zugüberwachung einzuführen, welches das gesamte Streckennetz der SBB abdeckt. Aufgrund einer öffentlichen Ausschreibung erhielt die französische

Firma Steria den Zuschlag zur Lieferung des neuen Systems. Dieses neue Betriebsleitsystem trägt den Namen Système Unifié de Régulation Ferroviaire (SURF). Da die Verantwortung für die Produktion des Betriebes in der Schweiz auf die Kreise delegiert ist, wurde bei jeder Kreisdirektion in Lausanne, Luzern und Zürich eine Leitzentrale eingerichtet [107]. Diese drei Betriebsleitzentralen sind mit einem zentralen Rechenzentrum in Bern verbunden, so daß der Informationsaustausch zwischen den Leitzentralen sichergestellt ist.

Zur automatischen Zugstandorterfassung werden analog zu der Deutschen Bahn die Zugnummernmeldeanlagen der Stellwerke verwendet. Auf den Strecken, wo keine entsprechend ausgerüstete Stellwerke vorhanden sind, setzen die SBB ein neuartiges System zur automatischen Fahrzeugidentifikation (AFI) ein. Dieses System erhält aus einem an den Triebfahrzeugen und Steuerwagen montierten Transponder Informationen über das jeweilige Fahrzeug und kann danach aus einer Fahrzeugdatenbank die jeweilige Zugnummer ermitteln [109]. Durch geeignete Positionierung dieser AFI-Lesegeräte können die notwendigen Zuglaufmeldungen auch bei nicht vorhandenen Zugnummernmeldeanlagen gewonnen und an die Betriebsleitzentrale übertragen werden.

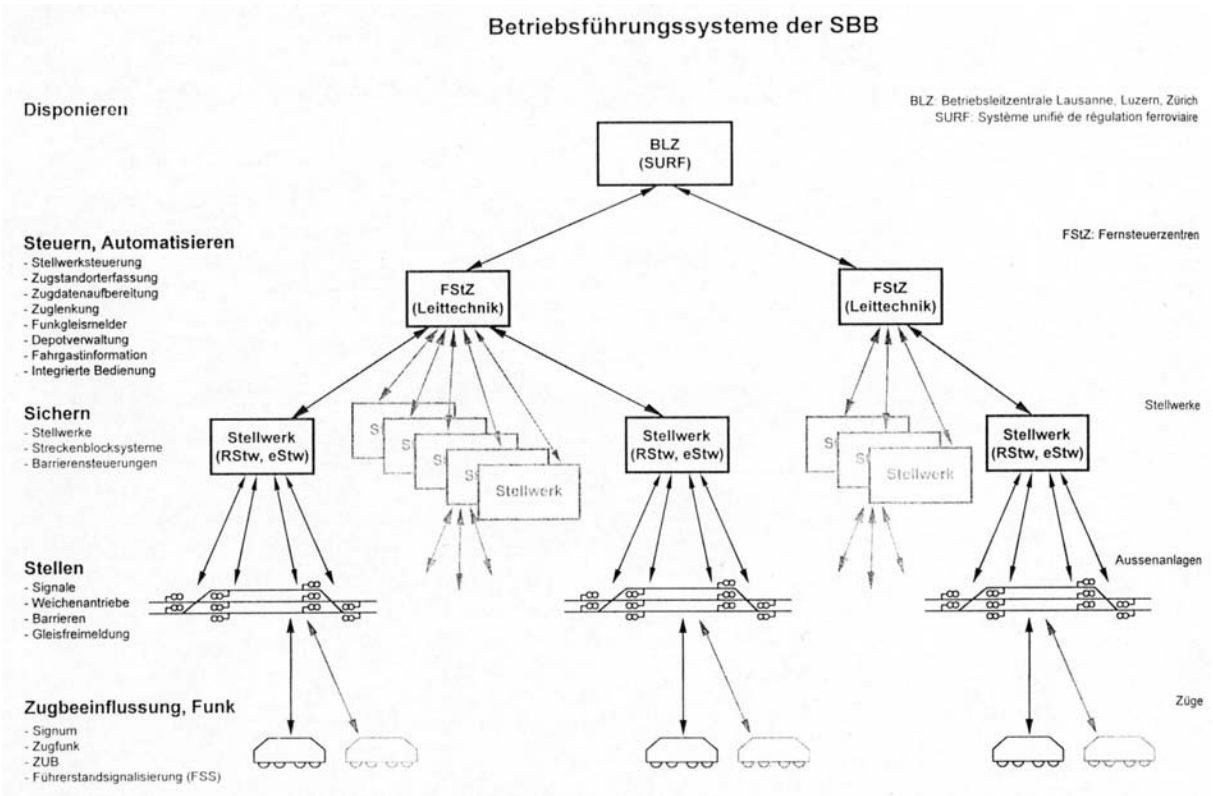

Abb. 12: Betriebsführungssysteme der SBB (aus [109])

Das Konzept der SBB für die Betriebsleitzentralen (siehe Abb. 12) weicht jedoch von dem der DB Netz AG für Betriebszentralen ab. In der Schweiz wird es nach wie vor die räumliche Trennung von Disposition und Operation geben. Aus rein technischer Sicht könnten alle Stellwerke von den drei Kreis-Betriebsleitzentralen ferngesteuert werden, jedoch zeigt die tägliche Betriebserfahrung, daß dies insbesondere bei Bauarbeiten und Betriebsstörungen nicht zweckmäßig ist [107]. Die Aufgabe der Steuerung der Stellwerke wird von sogenannten Fernsteuerzentren wahrgenommen. Dazu ist das Netz der SBB in ungefähr 30 Fernsteuerbezirke aufgeteilt.

Wesentliche Meilensteine hierzu waren das erste rechnerunterstützte Fernsteuerzentrum in Zürich Oerlikon und das mit Farbgraphikbildschirmen ausgestattete Fernsteuerzentrum in Arth-Goldau. Zur Fernsteuerung der Stellwerke wurde das ILTIS-Leitsystem von Siemens Integra Verkehrstechnik AG entwickelt. Mit ILTIS können die verschiedenen moderneren Stellwerkstypen (RSTW und ESTW) unter einer gemeinsamen Bedienoberfläche ferngesteuert werden. Erstmals wurde ILTIS im Jahr 1996 in Bern und in Bellinzona eingesetzt. Die Fernsteuerzentralen sind mit einer automatischen Zuglenkung ausgestattet, die abhängig von der Zugnummer und vom jeweiligen Tagesfahrplan das automatische Stellen der Zugfahrstraßen zum richtigen Zeitpunkt auslöst [40].

Die graphischen Darstellungen des Betriebsleitsystems SURF sind ähnlich aufgebaut wie in der BZ der DB AG. Der Disponent kann zwischen einer graphischen Streckenübersicht (oben links), der Streckenspiegel-Darstellung (oben rechts), der Knotenübersicht (unten links) sowie der Zeit-Weg-Linien-Darstellung (unten rechts) wählen (siehe Abb. 13).

Die Bahnhofstopologie und wichtige Daten eines Bahnhofs kann sich der Disponent in der Bahnhofsübersicht anzeigen lassen (siehe Abb. 14). Hierzu gehört neben der Gleisanordnung auch die Nutzlängen der Gleise, Signalstandorte, betriebliche Daten (beispielsweise Besetzungszeiten der Fahrdienstleiterarbeitsplätze, …) u. v. a.

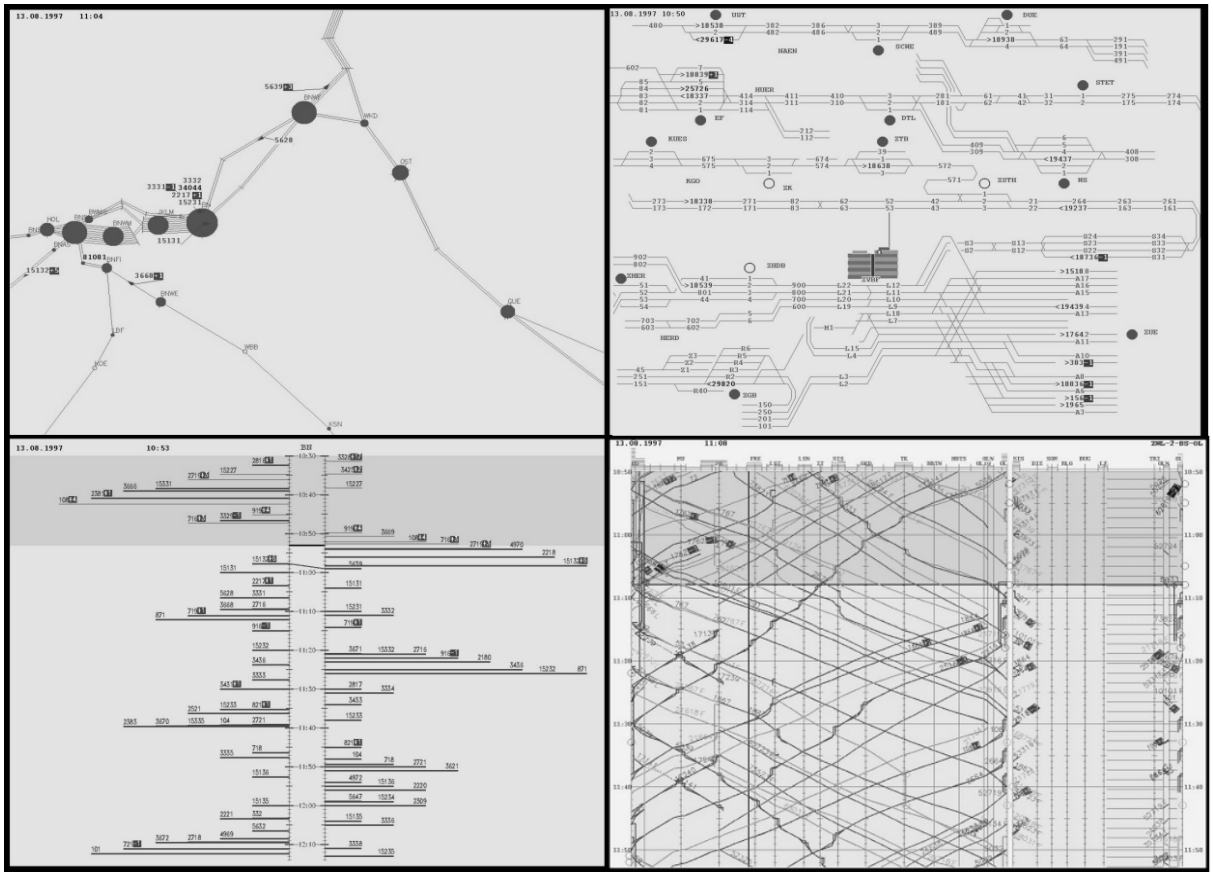

Abb. 13: Graphische Darstellungen aus SURF

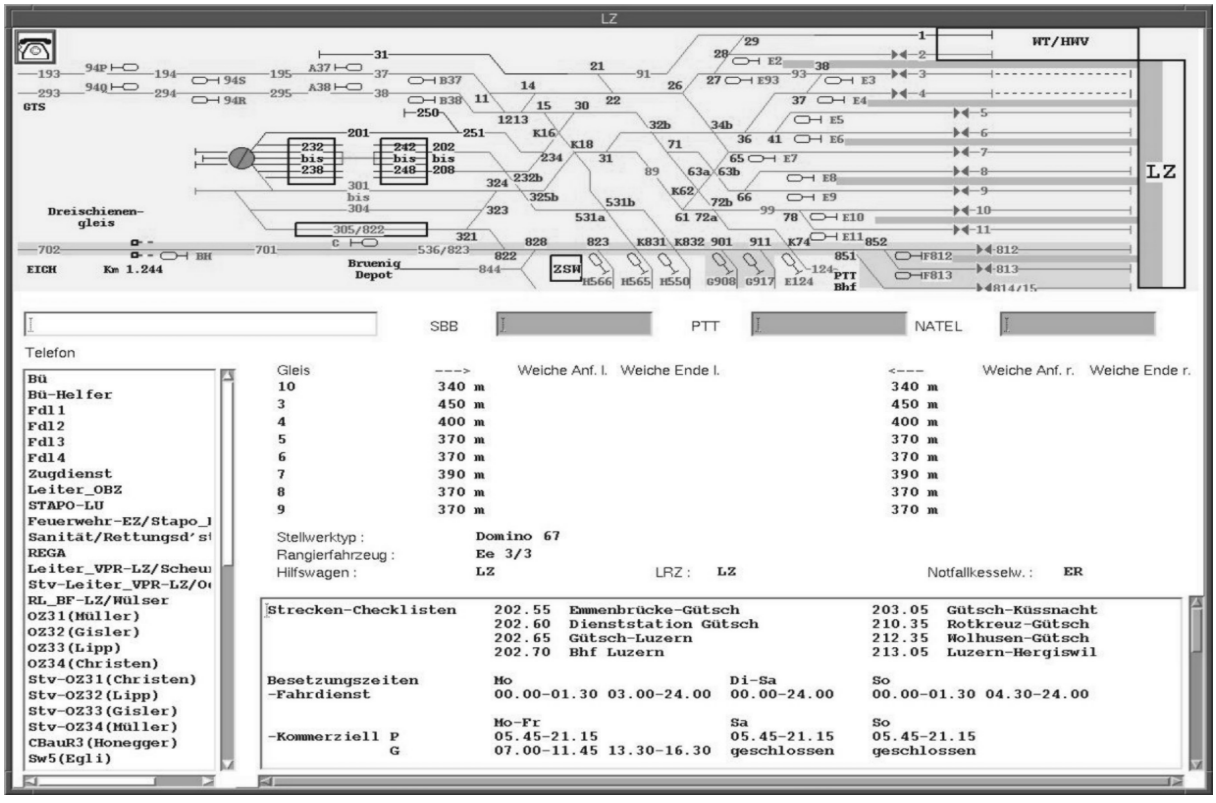

Abb. 14: Bahnhofsübersicht

4 Ansätze zur automatischen Disposition

Im diesem Kapitel sollen zunächst die Anforderungen an eine automatische Disposition und dann schon vorhandene Ansätze zur automatischen Disposition erläutert werden. Teilweise sind dies Verfahren zur Simulation des Eisenbahnbetriebes. In den nächsten Abschnitten werden zunächst die Grundlagen für die Simulationsverfahren erläutert. Anschließend werden einige ausgewählte Verfahren näher beschrieben.

4.1 Anforderungen an eine automatische Disposition

Die Hauptaufgabe der Disposition ist das Erkennen und Lösen von Konfliktfällen im Betriebsablauf, also bei Abweichungen vom Fahrplan Entscheidungen zu treffen, um zu dem zugrunde liegenden Fahrplan möglichst schnell wieder zurückkehren zu können. Dies muß auf der Grundlage eingetretener oder zu erwartender Ereignisse unter Einschluß aller einwirkenden Randbedingungen und Einflüsse geschehen. Hierzu hat die Disposition unter Berücksichtigung der aktuellen Gegebenheiten einen neuen konfliktfreien Dispositionsfahrplan zu erstellen.

Die Disposition muß dann Entscheidungen treffen, wenn durch die Zuglaufmeldungen erkannt wird, daß ein Zug signifikant von seiner Soll-Zeit-Weg-Linie abweicht und Konflikte ausgelöst werden. Hierbei ist eine automatische Konflikterkennung und -lösung zur Unterstützung der Disponenten erforderlich. Denn nach dem Lösen des Erstkonflikts verbleiben in der Regel noch weitere aus dieser Lösung resultierende Folgekonflikte. Auch diese Folgekonflikte müssen erkannt und gelöst werden, jedoch kann aufgrund weiterer zu erwartender zufälliger Einflüsse auf den Betriebsablauf nur für einen begrenzten Dispositionshorizont mit ausreichender Sicherheit disponiert werden [6]. Bei Konfliktlösungen müssen die Prioritäten der Züge angemessen berücksichtigt werden, wobei natürlich die Prioritäten nicht fest sein müssen. So kann beispielsweise ein verspäteter Zug eine höhere Priorität erhalten, damit er schneller seine Verspätung aufholen kann, oder aber wenn die Verspätung zu groß ist, eine niedrigere Priorität.

Die Disposition muß auf alle Störungen und Unregelmäßigkeiten, die im Betriebsgeschehen auftreten können, angemessen reagieren. Störungsursachen können zum Beispiel an Fahrwegelementen der Infrastruktur (Signale, Weichen, Gleise, …), an Triebfahrzeugen oder am Wagenmaterial auftreten. Auch zu hoher Reisendenandrang stellt eine typische Unregelmäßigkeit dar.

Bislang werden in den BZ nur die Zeit-Weg-Linien der Züge dargestellt, die im Verspätungsfall parallel verschoben werden. Hierbei ist keine Darstellung der Sperrzeitentreppen, die für eine genaue Konfliktermittlung notwendig sind, vorhanden.

In den Betriebszentralen (BZ) der Deutschen Bahn ist eine weitreichende Automation bei der Konflikterkennung und -lösung vorgesehen. Durch die Einführung weitergehender Automation ist eine Verbesserung von Produktivität, Qualität und Flexibilität in der Betriebsführung möglich.

4.1.1 Übergeordnete Disposition

Bei einfachen Verhältnissen mit geringem Risiko bezüglich des Auftretens und der Folgen von Fahrplanabweichungen kann die Disposition den Fahrdienstleitern überlassen werden. Aufgrund der hohen Belastungen erfordert die Mehrzahl der Strekken, insbesondere die Hauptabfuhrstrecken, eine zentrale Überwachung und Disposition [6]. Weiterhin müssen die Anschlüsse zwischen den Zügen in den Knoten des Netzes überwacht und gegebenenfalls auch hier Dispositionsentscheidungen getroffen werden. Da zwischen der Strecken- und Knotendisposition jedoch starke Wechselwirkungen bestehen, ist eine gemeinsame netzweite Betrachtungsweise zwingend erforderlich. Es reicht nicht, die Konflikte auf den Strecken optimal zu lösen, wenn dadurch Züge bei der Einfahrt in den Knoten aufgrund von Fahrtenausschlüssen Wartezeiten erleiden. Die potentiellen Konflikte auf der Strecke, Fahrstraßenausschlüsse in den Knoten, das Vorhandensein von freien Gleisen in den Knoten und die Anschlußkonflikte müssen im Zusammenhang gelöst werden.

Eine übergeordnete Disposition ist eine grundlegende Voraussetzung für qualitativ hochwertige Dispositionsentscheidungen. Nur mit Hilfe einer vorausschauenden Disposition, die nicht die beschränkte Sichtweise eines Triebfahrzeugführers oder eines Fahrdienstleiters nachbildet, besteht die Möglichkeit, auch weiter entfernt liegende Konflikte zu erkennen und zu lösen. Somit können dann auch die potentiellen Fahrstraßenausschlüsse in den gegebenenfalls weiter entfernt liegenden Knoten erkannt und gelöst werden.

4.1.2 Berücksichtigung aktueller Gegebenheiten

Für qualitativ gute Dispositionsentscheidungen ist es erforderlich, daß alle Gegebenheiten des aktuellen Betriebsgeschehens berücksichtigt werden. Hierbei ist es insbesondere sehr wichtig, zu jedem Zeitpunkt möglichst genau den Standort der einzelnen Züge zu kennen. Daher kommt der Verfolgung des Zuglaufes eine hohe Bedeu-

tung zu. Außerdem können bei der Disposition die Zugdaten für die Fahrtzeitrechnung verwendet werden, die tatsächlich auch vorliegen.

4.1.2.1 Zugstandortbestimmung

In der Betriebszentrale (BZ) geschieht die Zuglaufverfolgung größtenteils über die Zugnummernmeldeanlagen (ZN) oder manuell durch das Leitsystem Betriebliche Informationsverteilung (LeiBIT). Die ZN erfordern jedoch hohe Kosten sowohl für die Anschaffung als auch für die Wartung. Auf die Gleisschaltmittel könnte verzichtet werden, wenn der Zug sich selber orten könnte. Aufgrund der Gleisschaltmittel kann die Position des Zuges auch nur an wenigen Orten exakt ermittelt werden. Dies kann nur dann erfolgen, wenn der Zug an der Position ist, an der der Signalhaltfall ausgelöst wird und somit eine Zuglaufmeldung an die BZ geschickt wird. Zwischen den einzelnen Signalstandorten ist auf Strecken ohne LZB keine nähere Positionsbestimmung möglich. Zweckmäßig wäre jedoch eine genauere Ortung der Züge, die mittels moderner Betriebsleittechnik auch zukünftig machbar ist.

Eine Möglichkeit für die Ortung sind passive Balisen. Diese Balisen können im European Train Control System (ETCS) europaweit einheitlich verwendet werden. Sie senden beim Überfahren eine eindeutige Information. Damit kann das Fahrzeug seine Position an den Balisenstandorten exakt bestimmen. Zusätzlich werden Radimpulsgeber an den Fahrzeugen verwendet, die die Position des Fahrzeuges zwischen den ETCS-Balisen bestimmen können. Eine weitere Möglichkeit, einen Zug zu orten, ist das Global Positioning System (GPS). Hierbei ermittelt das Triebfahrzeug satellitengestützt seine Position. An Stellen, an denen kein Satellitenkontakt hergestellt werden kann (z. B. Tunnel, tiefe Einschnitte, …), wird das Verfahren mit passiven ETCS-Balisen und der Radumdrehung angewandt. In diesen Fällen meldet der Zug dann die von ihm selbst ermittelte Position per Funk (GSM-R) an den Dispositionsrechner. Für diese genauere Ortung der Züge nur zu dispositiven Zwecken ist im Gegensatz zur Zugsteuerung mit ETCS keine zuginterne Integritätsprüfung notwendig.

Die Meldungen des Zugstandortes per Funk (GSM-R) an den Dispositionsrechner können entweder in regelmäßigen Abständen oder auf Anforderung erfolgen. Dann würde der Dispositionsrechner den Zug anfunken und eine Zugstandortmeldung anfragen. Moderne Triebfahrzeuge sind jedoch schon mit einem Rechner ausgestattet, so daß man ihn auch für diesen Zweck verwenden kann. Dann kann man jeweils aktuell dem Rechner auf dem Triebfahrzeug die Soll-Zeit-Weg-Linie übermitteln, und das Triebfahrzeug gibt nur dann eine Zugstandortmeldung ab, wenn von der Soll-

Zeit-Weg-Linie signifikant abgewichen wird. Dadurch läßt sich auch der Funk- und Kommunikationsaufwand minimieren.

Für weiterführende Literatur zum Thema ETCS sei hier auf [108] und [110] verwiesen, zum Thema GSM-R auf [1], [9], [62] und [111] sowie zum Thema Ortung per GPS auf [31] und [86].

4.1.2.2 Aktuelle Zugdaten

Der jeweilige Tagesfahrplan, der in den BZ als Datengrundlage dient, ist aus dem zugrundeliegenden Jahresfahrplan abgeleitet. Hierin sind die geplanten Zugdaten (Tfz-Baureihe, Last, Länge, …) enthalten. In der Realität kann es jedoch zu Abweichungen kommen. Beispielsweise können die tatsächliche Last und Länge bei Güterzügen im Wochenverlauf größeren Schwankungen unterliegen. Während im Jahresfahrplan hier immer mit einer Maximallast und einer Maximallänge gerechnet wird, können bei der Disposition die vorhandene Last und Länge berücksichtigt werden. So wird die Last Auswirkungen auf die Fahrzeitberechnung und die Länge gegebenenfalls Auswirkung auf die Wahl von Überholungsmöglichkeiten haben. Größere Abweichungen vom Fahrplan treten auch auf, wenn z. B. bei einem Ausfall eines ICE ein lokbespannter Ersatzzug gefahren wird. Auch diese Auswirkungen müssen bei der Disposition berücksichtigt werden.

In der BZ gilt es nun, diese aktuellen Parameter der Züge zu kennen und in den Prognosen zu berücksichtigen. Kenntnis über die Abweichungen von den geplanten Zugparametern hat jedoch zunächst nur das jeweilige Eisenbahnverkehrsunternehmen und nicht die DB Netz AG als Netzbetreiber. Hier müssen in Zukunft Schnittstellen zwischen den Systemen der EVU und DB Netz AG erstellt werden, so daß diese für qualitativ gute Dispositionsentscheidungen notwendigen Daten der BZ zur Verfügung gestellt werden können.

4.1.3 Einlegen von Sonderzügen

Die Basis für die Disposition ist der langfristig erarbeitete Jahresfahrplan, der aufgrund von Wunschfahrplänen der Trassenbesteller durch das Trassenmanagement erstellt wird. Hieraus wird der Tagesfahrplan abgeleitet, in den die unterjährigen Fahrplanänderungen sowie ggf. zusätzliche Züge eingehen. Im Gegensatz zum Jahresfahrplan, der das ganze Jahr gilt, ist der Tagesfahrplan auf einen bestimmten Tag fixiert. Dieser Tagesfahrplan ist der Fahrplan, mit dem die aktuellen Abfahrts- und Durchfahrtszeiten verglichen werden müssen, um so die Verspätungen zu ermitteln.

Ein automatisches Dispositionssystem sollte auch über die Möglichkeit verfügen, einen Fahrplan für neue, im Tagesfahrplan noch nicht vorgesehene kurzfristige Sonderzüge konstruieren zu können. Die Eingabe der Zugdaten (Tfz-Baureihe, Last, Länge, …) sowie des gewünschten Laufweges des Zuges erfolgt hierbei analog zur Fahrplankonstruktion. Nach der Eingabe der Wunschabfahrtszeit kann die Berechnung der Fahrzeiten und Sperrzeiten erfolgen. Zur Konfliktlösung ist neben der manuellen Bearbeitung auch eine automatische Fahrplankonstruktion möglich, weil das Dispositionssystem einen Konfliktlösungsalgorithmus beinhaltet, der dann zur automatischen Fahrplankonstruktion verwendet werden kann. Dies ermöglicht eine schnelle Ermittlung einer Fahrplantrasse für den Zug. Dabei wird der bestehende Fahrplan im Regelfall nicht verändert, sondern nur für den neuen Sonderzug eine noch freie Fahrplantrasse gesucht.

4.2 Simulationsverfahren für den Eisenbahnbetrieb

Im folgenden sollen nur die Verfahren, die eine detaillierte Simulation des Betriebes in Netzteilen ermöglichen, näher erläutert werden. Um den realen Betriebsablauf nachzubilden, wurden verschiedenartige Simulationsmodelle entwickelt. Simulationsverfahren versuchen, die Realität in einem Modell möglichst exakt nachzubilden.

Hierbei sind neben den Infrastrukturdaten auch die fahrdynamischen Parameter der Züge zu berücksichtigen. Aufgrund der komplexen Berechnung insbesondere der Beschleunigungsvorgänge ist dies im Eisenbahnverkehr recht aufwendig. Daher kommen heutzutage fast nur Rechnersimulationen zum Einsatz. Hierzu müssen die Infrastruktur und die darauf stattfindenden Zugfahrten in einem Modell abgebildet werden. Simulationsverfahren sind seit vielen Jahren bei der Eisenbahn Standard für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen. Für eine Übersicht über die zur Zeit eingesetzten Simulationsmodelle für den Schienenverkehr sei auf [13] und [94] verwiesen.

4.2.1 Einsatzbereiche

Für Simulationsverfahren in der Eisenbahnbetriebswissenschaft gibt es vielfältige Einsatzbereiche. Strategische Planungen sind Einsatzbereiche für einen größeren Zeithorizont. Hierbei werden Aus- oder Neubauten von Eisenbahninfrastruktur untersucht. Dies kann sowohl Änderungen auf der Strecke als auch im Bahnhof betreffen. Mit den Simulationsverfahren ist es möglich, mehrere Varianten der geplanten Infrastrukturmaßnahme im Modell zu realisieren und nach der Simulation zu bewerten. So kann die Lage der Überholungsbahnhöfe oder die signaltechnische Ausrüstung einer

Neubaustrecke durch Simulationsergebnisse optimiert werden. Da eine Infrastrukturmaßnahme teilweise umfangreiche Planungen erforderlich macht (z. B. Bau einer Aus- oder Neubaustrecke), ist der Zeitvorlauf bei strategischen Planungen relativ groß.

Im Gegensatz hierzu sind die operativen Planungen zu sehen, deren Zeithorizont viel kürzer ist. So können verschiedene Fahrplanvarianten auf ihre Verwendbarkeit im Betrieb überprüft werden. Dabei werden fertig konstruierte Fahrpläne mit Störungen, die sich auch im realen Betriebsablauf ergeben, bei der Simulation berücksichtigt und das Verhalten des Fahrplans hierauf untersucht. Dabei hat die Verteilung der Pufferzeiten zwischen den Zugfahrten einen erheblichen Einfluß auf die Betriebsqualität. Diese kann für die Simulationsläufe variiert und dann auch optimiert werden, so daß insgesamt qualitativ höherwertige Fahrpläne erstellt werden können.

Auch für die Baubetriebsleitplanung sind Simulationsverfahren von großem Nutzen. Die Baubetriebsleitplanung erstellt kurzfristig Fahrpläne für Baumaßnahmen. Mit Simulationsverfahren werden die Auswirkungen der geplanten Baumaßnahme im voraus simuliert, und die Behinderungen auf die Züge können dann beurteilt werden. Bei umfangreichen Bauarbeiten kann auf dieser Grundlage entschieden werden, welche Züge beispielsweise auf andere Strecken umgeleitet werden müssen, um den Betriebsablauf nicht nachhaltig zu stören.

Simulationsverfahren können auch für taktische Ad-hoc-Planungen eingesetzt werden. So werden beispielsweise Sonderzüge relativ kurzfristig geplant, teilweise erst kurz vor Abfahrt des Zuges. Mit den Simulationsverfahren kann man dann für diese Züge einen Fahrplan erzeugen, der die anderen Zugfahrten nicht beeinträchtigt.

4.2.2 Simulation der Fahrplanerstellung

Bei den Simulationsverfahren in der Eisenbahnbetriebswissenschaft unterscheidet man grundsätzlich zwei Stufen. Bei der ersten Stufe handelt es sich um die Simulation der Fahrplanerstellung, die zweite ist die Simulation des Betriebsablaufs. Die Simulation der Fahrplanerstellung versucht, die Fahrplankonstruktion nachzuempfinden. Hierbei wird ausgehend von den Trassenbestellungen der Eisenbahnverkehrsunternehmen ein konfliktfreier Fahrplan erstellt. Die automatische Fahrplanerstellung berücksichtigt dabei die diskriminierungsfreie Trassenvergabe. Das bedeutet, daß alle Trassen, die zu dem gleichen Trassenpreis verkauft wurden, auch gleichwertig behandelt werden müssen und nicht die konzerninternen gegenüber den übrigen Eisenbahnverkehrsunternehmen bevorzugt werden dürfen.

Ein solcher Fahrplanautomat, der automatisch und diskriminierungsfrei konfliktfreie Fahrpläne erstellt, ist für die Netzbetreiber sinnvoll einsetzbar. Nicht nur um Personal bei den Fahrplanbearbeitern einzusparen, sondern auch um auf kurzfristige Trassenbestellungen schnell reagieren zu können. Dies ist für einzulegende Sonderzüge nützlich, die kurzfristig während der laufenden Fahrplanperiode bestellt werden.

Für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen von existierenden Strecken, die nur leicht variiert werden sollen, kann im Regelfall der vorhandene Fahrplan für die Betriebssimulation direkt oder zumindest als Grundlage verwendet werden. Wenn man jedoch die Betriebsqualität einer Neubaustrecke untersuchen will, die vielleicht erst in zehn Jahren zur Verfügung steht, ist der genaue Fahrplan noch unbekannt. Oftmals existieren nur vage Angaben zu dem Zugkollektiv, z. B. Anzahl von Zügen einer Zuggattung pro Stunde. Da jedoch der zugrundeliegende Fahrplan einen großen Einfluß auf die Ergebnisse der Simulation der Betriebsabwicklung hat, sollten in diesen Fällen unterschiedliche Fahrpläne als Ausgangslage Verwendung finden. Natürlich können diese Fahrpläne auch von Hand erstellt werden, jedoch ist dies für eine größere Anzahl von Fahrplänen ein nicht mehr zu vertretender Aufwand. Hierfür ist die Simulation der Fahrplanerstellung sehr nützlich, denn mit ihr können viele Fahrplanvarianten in kurzer Zeit für die Simulation der Betriebsabwicklung erstellt werden.

Die Simulation der Fahrplanerstellung liefert außer dem konfliktfrei erstellten Fahrplan noch weitere Ergebnisse, die Rückschlüsse auf das zugrundeliegende Betriebsprogramm oder die Infrastruktur zulassen. Im wesentlichen handelt es sich hierbei um die planmäßigen Wartezeiten. Diese planmäßigen Wartezeiten, die schon im Fahrplan enthalten sind, können noch nach „Wartezeiten auf Einfädelung“, die am Beginn des Laufwegs der Züge auftreten, und „Wartezeiten unterwegs“, die im Laufweg der Züge entstehen, unterschieden werden. Als weitere Ergebnisse stehen die Belegungsgrade von einzelnen Belegungselementen (Signale, Überholungsgleise, …) zur Auswertung zur Verfügung. Aufgrund dieser Belegungsgrade kann eine Engpaßidentifikation im Zustand der Fahrplanerstellung vorgenommen werden.

4.2.3 Simulation des Betriebsablaufs

In dieser Stufe wird ein Fahrplan im Betriebsablauf simuliert. Hierbei wird entweder ein in der vorhergehenden Stufe der Simulation der Fahrplanerstellung erzeugter Fahrplan oder ein manuell (mit Rechnerunterstützung) konstruierter Fahrplan als Grundlage verwendet. Dieser konfliktfreie Fahrplan wird dann bei der Simulation des Betriebsablaufs Störungen unterworfen. Diese Störungen werden in Form von Wahr-

scheinlichkeitsverteilungen durch den Anwender vorgegeben, so daß sie die realen Störungen widerspiegeln. Weiterhin können sie in vielfältiger Art und Weise ausfallen. So gehören sowohl Einbruchs- als auch Unterwegsverspätungen zu solchen Störungen.

Die Einbruchsverspätungen werden beim Einbruch des Zuges in das Untersuchungsgebiet eingespielt. Die Anfangsverspätungen sind Verspätungen am Laufweganfang in einer Betriebsstelle im untersuchten Gebiet. Unterwegsverspätungen treten im weiteren Verlauf der Zugfahrt auf; sie können verkehrlich oder betrieblich bedingt sein. Eine typische verkehrliche Störung ist eine Haltezeitverlängerung aufgrund zu hohen Reisendenandrangs. Betriebliche Störungen sind beispielsweise Ausfall oder Störung eines Signals oder eine Gleissperrung.

Mit einem Zufallsgenerator werden dann für eine Simulation aus den vorgegebenen Verteilungen zufällige Störungen generiert. Dadurch können Konflikte zwischen den verspäteten oder zwischen den verspäteten und den planmäßigen Zugfahrten entstehen. Die Simulationsverfahren stellen dann die Disposition nach und lösen die aufgetretenen Konflikte.

Bei der Simulation des Betriebsablaufs werden vielfältige Ergebnisse protokolliert und zur Auswertung bereitgestellt. Zum einen sind dies die außerplanmäßigen Wartezeiten bzw. Folgeverspätungen. Diese lassen sich wie bei der Fahrplanerstellung in „Wartezeiten auf Einfädelung“ und „Wartezeiten unterwegs“ unterscheiden. Zum anderen werden die Ausbruchsverspätungen zur Verfügung gestellt, die die Züge beim Ausbruch aus dem Untersuchungsbereich noch besitzen. Diese können dann zugweise mit den Einbruchsverspätungen verglichen werden, so daß festgestellt werden kann, welche Zuggattungen im Untersuchungsbereich zusätzliche Verspätungen erhalten und welche ihre Verspätung haben reduzieren können. Es ist außerdem möglich, die Belegungsgrade der einzelnen Elemente sowie die Verspätungsentwicklung eines Zuges oder mehrerer Züge im Verlauf ihres Laufwegs zu untersuchen.

Mit Hilfe dieser Ergebnisdaten aus der Simulation der Betriebsabwicklung können Rückschlüsse auf die Qualität des Fahrplans oder der Infrastruktur gewonnen werden. Insbesondere können die Ergebnisse mehrerer Infrastrukturvarianten miteinander verglichen werden, um so beispielsweise die optimale Lage von Überholungsbahnhöfen auf Neubaustrecken zu ermitteln.

4.3 Synchrone Verfahren

Bei den Verfahren für die detaillierte Betriebssimulation werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: synchrone und asynchrone Verfahren. Die synchronen Verfahren vollziehen die Simulation in Zeitschritten, d. h. die Ereignisse werden in ihrer zeitlichen Reihenfolge betrachtet und abgearbeitet. Synchrone Verfahren legen die Züge gemäß einem Zeitschrittverfahren ein. Dabei läuft eine interne Uhr, welche die Simulationszeit darstellt, und alle Züge werden schrittweise berücksichtigt, d. h. es wird berechnet, wie weit jeder einzelne Zug in dem Zeitschritt gekommen ist. Nachdem dies für alle Züge berechnet worden ist, kann die interne Uhr um eine Zeiteinheit vorgerückt werden. Diese Zeitschritte können entweder gleich groß sein, oder aber auch in der Größe variieren; im letzteren Fall wird der Zeitschritt ereignisorientiert festgelegt. Das Ende der Simulation ist dann erreicht, wenn die interne Uhr den gesamten Untersuchungszeitraum einmal durchlaufen hat.

Konflikte entstehen dadurch, daß ein Zug in einem Zeitschritt einen Abschnitt belegen will, der von einem anderen Zug noch nicht geräumt wurde. Die Konflikte werden erst zum Zeitpunkt ihres Auftretens erkannt und dann in diesem Zeitschritt gelöst. Hierdurch wird der Zug gestutzt bzw. gegebenenfalls muß er sogar vor dem haltzeigenden Signal anhalten, wenn nicht ein alternativer Fahrweg vorhanden ist.

Die synchronen Verfahren können in der ursprünglichen Form keine Prioritäten der unterschiedlichen Zugfahrten berücksichtigen. Wenn zwei Züge auf eine Einfädelung zufahren, erhält der Zug den Vorrang, der die Einfädelung zuerst erreicht. In einem solchen Fall würde auch ein Übergabegüterzug Vorrang vor einem ICE erhalten. Da dies bei der Simulation unerwünscht ist (und auch im Regelfall in der Realität nicht vorkommt), muß die Priorität der Züge in irgendeiner Art berücksichtigt werden.

Durch diese synchrone Modellierung der Betriebsabwicklung wird die beschränkte Sichtweise der Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter simuliert. Vorausschauende Dispositionsentscheidungen, wie sie beispielsweise in der Rechnerunterstützten Zugüberwachung oder der Betriebszentrale getroffen werden, lassen sich durch die synchrone Simulation nicht unmittelbar berücksichtigen.

Mit den synchronen Verfahren ist es nicht möglich, einen Fahrplan automatisch zu konstruieren. In einem optimalen Fahrplan sollen alle Züge nach Möglichkeit unbehindert verkehren können. Insbesondere sollen die Züge auf der Strecke nicht behindert, also nicht gestutzt werden. Dies läßt sich jedoch mit synchronen Verfahren nicht realisieren. Synchrone Verfahren können allerdings als Hilfsmittel zur Fahrplankonstruktion verwendet werden; in [39] wird eine Fahrplankonstruktion beschrieben, in

der für jeweils einen Zug eine Fahrplantrasse gesucht wird. Durch Wiederholung dieser Trassensuche für alle Züge ergibt sich ein Fahrplan. Dies ist dann jedoch eine asynchrone Fahrplankonstruktion mit der Datengrundlage (z. B. Infrastrukturabbildung) und Berechnungsverfahren (z. B. Fahrzeitrechnung) eines synchronen Simulationsmodells.

Die synchrone Vorgehensweise ermöglicht jedoch, Störungen im Betriebsgeschehen direkt einzuspielen. So können beispielsweise Signalstörungen unmittelbar im Betriebsablauf bei den betreffenden Zugfahrten berücksichtigt werden. Ein weiteres Problem von synchronen Verfahren sind Blockierungen (Deadlocks), die auf eingleisigen Strecken auftreten können. In einer Deadlock-Situation sind mehrere Züge durch die synchrone Vorgehensweise so auf die freie Strecke geleitet worden, daß zu einem Zeitpunkt keine Möglichkeit mehr besteht, die Züge weiterfahren zu lassen. Diese Blockierungen, bei denen keine Weiterfahrt mehr möglich ist, müssen durch zusätzliche Algorithmen vermieden werden.

4.3.1 SIMU VII

Ein Vertreter der synchronen Simulationsmodelle ist SIMU VII. Dieses Simulationssystem wurde am Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb (IVE) der Universität Hannover zur betrieblichen Simulation von Eisenbahnknoten entwickelt. SIMU VII wird nun von dem Ingenieurbüro für Bahnbetriebssysteme GmbH weiterentwickelt und ist als Planungswerkzeug bei den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) sowie der Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen im Einsatz.

Die Infrastruktur wird in einem gerichteten und bewerteten Graphen abgebildet [55]. Die Knoten des Graphen entsprechen den Punkten, die für die zeitliche, räumliche und sicherungstechnische Abwicklung von Bedeutung sind (z. B. Signalstandorte, Geschwindigkeits- und Widerstandswechsel, …). Den verbindenden Kanten werden Attribute (z. B. zulässige Geschwindigkeit, Länge, Neigung, …) zugewiesen [64]. Da die Attribute den Kanten des Graphen zugeordnet werden, nennt man diesen Graphen „kantenbewertet“. Komplexere Strukturen, beispielsweise zur Abbildung des Zugsicherungssystems, werden durch Zusammenfassung einzelner Kanten aufgebaut. So bildet die Kantenfolge zwischen zwei Hauptsignalen einen Blockabschnitt. Fahrwege ergeben sich als eine Abfolge von Blockabschnitten und sogenannte Fahrtrichtungen durch eine Zusammenfassung von Fahrwegen. Diese Fahrtrichtung bestimmt dann den Laufweg des Zuges.

Das ursprünglich für die Simulation von Eisenbahnknoten entwickelte Verfahren wurde erweitert, so daß auch größere Eisenbahnnetze abgebildet werden können [57],

[58]. Da die Streckendaten extrem redundant aufgebaut sind, mußte eine Rechnerunterstützung entwickelt werden, die die Widerspruchsfreiheit bei größeren Graphen garantieren kann [56].

Die einzelnen Zugfahrten werden zu sogenannten Gattungen (Modellzügen) zusammengefaßt. Diese Klassen von Zügen besitzen identische Zugparameter (Länge, Gewicht, maximale Geschwindigkeit, Bremsverzögerung und Anfahrbeschleunigung). Der Fahrtverlauf des Zuges wird durch die Angaben einer Folge von Betriebsstellen (sogenannten Querschnitten) vorgegeben. Für jede Betriebsstelle müssen dann Haltezeit, Abfahrts- bzw. Durchfahrtszeit und ein Gleis angegeben werden. Die im Fahrplan vorhandenen Regel- und Sonderzuschläge können nicht unmittelbar eingegeben werden, daher ist ein Eichungsvorgang erforderlich. Bei dieser Eichung werden die zulässigen Geschwindigkeiten so verändert, daß die Regelfahrzeit eingehalten wird [58]. Dieser Eichungsvorgang muß für alle Strecken und alle Züge durchgeführt werden.

Da synchrone Verfahren Fahrpläne nicht automatisch erstellen können, muß ein für die Simulation zugrundeliegender Fahrplan manuell eingegeben werden. Hierzu wurde das Fahrplankonstruktionsprogramm SIMUPLAN basierend auf den Modellstrukturen von SIMU VII entwickelt [44]. Mit SIMUPLAN können einzelne Züge eingegeben und bearbeitet werden. Nach der Festlegung der Zugparameter und des Laufwegs werden offensichtliche Konflikte im Fahrplan (Überschneidung von Gleisbelegungen, …) unmittelbar angezeigt. Jedoch können die Abhängigkeiten zwischen den Zugfahrten, die sich aus der Sicherungstechnik ergeben, nicht erkannt werden. Daher muß mit Hilfe einer Simulation der konstruierte Fahrplan auf seine praktische Fahrbarkeit überprüft werden. Erst in diesem Schritt können sämtliche Konflikte zwischen den Zügen erkannt werden.

Dieser konstruierte Fahrplan wird dann beispielsweise für Stabilitätsuntersuchungen mit zufälligen Störungen überlagert. Als Störungen können Einbruchsverspätungen, Verlängerungen der Haltezeiten und Betriebseinschränkungen (z. B. Signalstörungen, …) eingespielt werden [58]. Hiermit kann dann die Empfindlichkeit des konstruierten Fahrplans gegenüber den in der Realität auftretenden Unregelmäßigkeiten ermittelt werden.

Wie bei allen synchronen Simulationsverfahren werden auch bei SIMU VII die Züge gemäß einem Zeitschrittverfahren eingelegt. Die Zugbewegungen aller Züge werden für den jeweils nächsten Zeitschritt berechnet. Versucht dabei ein Zug, einen Abschnitt zu belegen, der von dem vorausfahrenden Zug noch nicht geräumt wurde, tritt ein Konflikt auf. Diese Konflikte werden dann unmittelbar nach ihrem Erkennen ge-

löst. Auf der Strecke, auf der keine alternativen Fahrwege zur Verfügung stehen, führt dies unweigerlich zu einem Stutzen des nachfolgenden Zuges, d. h. der nachfolgende Zug muß zunächst abbremsen und anschließend wieder beschleunigen. Dieser unerwünschte Effekt sollte durch eine vorausschauende Disposition im Eisenbahnbetrieb vermieden werden.

Ein weiteres Problem der synchronen Verfahren ist die Beachtung der Hierarchie der einzelnen Zugfahrten. Wenn z. B. zwei Züge, ein ICE und ein Üg, sich einer Einfädelung nähern, sollte hier der ICE Vorrang gegenüber dem Üg erhalten, auch wenn der Üg die Einfädelungsweiche als erster Zug passieren würde. Damit dies im synchronen Verfahren berücksichtigt werden kann, muß mit sogenannten Vorausbelegungen gearbeitet werden. Im obigen Beispiel erhält der höherrangige ICE eine Vorausbelegung von mehreren Blöcken, so daß die Einfädelungsweiche vorausbelegt und somit für den ICE reserviert wird, auch wenn der Üg eher an der Weiche eintreffen würde. Durch die virtuellen Vorausbelegungen wird erreicht, daß der ICE den Vorrang erhält, jedoch mit der Konsequenz, daß real nicht existierende Belegungen von Weichen usw. erzeugt werden. Dadurch werden auch andere Zugfahrten verhindert, die den Lauf des ICE nicht behindern würden, jedoch aufgrund der Vorausbelegungen nicht möglich sind.

Diese in der Realität nicht existierenden Belegungen führen zu Behinderungen, so daß insbesondere bei einem dichten Fahrplan die Infrastruktur nicht optimal genutzt wird. Bei dieser Art der Modellierung der Prioritäten wird die Simulation eine geringere Kapazität der Infrastruktur ermitteln als in der Realität tatsächlich vorhanden ist. Daher wird durch die Anwendung der Vorausbelegungen die Kapazität scheinbar vermindert.

Nach Abschluß der Simulation können die im Laufe einer Mehrfachsimulation gesammelten Daten aufbereitet werden. Beispielsweise ist eine Auswertung über die mittlere Verspätung oder die Zusatzverspätung entlang des Zuglaufs möglich. Weiterhin können die Verspätungen in den entstandenen Bahnhöfen angezeigt werden.

4.3.2 SIMU ++ / RailSys

Das Simulationsmodell SIMU ++ stammt aus der SIMU-Familie und wurde ebenfalls wie SIMU VII am Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb (IVE) der Universität Hannover entwickelt. SIMU ++ wurde unter Verwendung eines objektorientierten Ansatzes komplett neu entwickelt. Ab März 1999 wird dieses Planungs- und Simulationsprogramm unter dem Namen RailSys von den Rail Management Consultants (RMCon) vertrieben, zu der sowohl das IVE als auch die HaCon Ingenieurge-

sellschaft mbH gehört. RailSys ist im Einsatz bei der Deutschen Bahn AG und bei diversen inländischen und ausländischen Ingenieurbüros.

SIMU ++ ist ein Modell zur mikroskopischen Abbildung des Eisenbahnbetriebes auf beliebig großen Netzen und verwendet einen kantenbewerteten Graphen zur Infrastrukturabbildung. Neben dieser Übereinstimmung zwischen den Modellen SIMU ++ und SIMU VII sind auch die Angaben zu den Modellzugdaten (Gattungen) in den Modellen identisch.

Auch in SIMU ++ ist eine interaktive Fahrplankonstruktion enthalten. Die Erstellung von Fahrplänen erfolgt mit Hilfe des dargestellten Sperrzeit- oder Zeit-Weg-Linien-Diagramms. Hierbei werden die exakten Belegungszeiten (Sperrzeiten) der einzelnen Fahrwegelemente ermittelt und sofort dargestellt [38]. Dies stellt eine Weiterentwicklung der in den älteren Versionen der SIMU-Familie verwendeten Annäherung der Sperrzeiten durch feste Beleg- und Räumzeiten dar.

Eine automatische Trassensuche auf der Grundlage von SIMU ++ wurde in [39] konzipiert. Mit diesem Verfahren kann für einen Zug eine Trasse automatisch gefunden werden. Dabei werden alle im Fahrplan schon vorhandenen Züge nicht verändert, sondern nur für den gerade neu eingelegten Zug werden der Fahrweg, die Haltezeiten oder die Fahrzeit so verändert, daß keine Konflikte im Fahrplan mehr vorhanden sind. Alternativ können auch Konflikte mit niederrangigen Zügen zugelassen werden, dann muß jedoch die Trassensuche anschließend für alle niederrangigen Züge so oft wiederholt werden, bis alle Konflikte gelöst worden sind.

Für eine automatische Fahrplankonstruktion werden zunächst alle Trassenwünsche gesammelt. Ein Trassenwunsch für eine Zugfahrt besteht aus einer vorgegebenen Betriebsstellenreihung der Verkehrshalte mit einer Wunschabfahrtszeit in einer Betriebsstelle sowie den jeweiligen Zugparametern. Die Züge werden nun anhand ihrer Priorität bzw. bei gleicher Priorität anhand der Einbruchszeit sortiert und in dieser Reihenfolge nacheinander über den gesamten Laufweg in den Fahrplan eingelegt. Die auftretenden Konflikte werden durch Veränderung des gerade in Bearbeitung befindlichen Zuges gelöst. Dies entspricht der einfachen asynchronen Vorgehensweise, wie sie auch bei STRESI (siehe Abschnitt 4.4.1) angewendet wird.

Die Simulation der Betriebsabwicklung erfolgt synchron im Zeitschrittverfahren, wie schon bei SIMU VII beschrieben. Bei SIMU ++ wurde jedoch die Umsetzung der Prioritäten in Vorausbelegungen überarbeitet und verfeinert. So werden nicht mehrere Blöcke virtuell vorausbelegt, sondern die Belegungselemente gemäß ihrer tatsächlichen Belegungszeit reserviert. Hierfür werden die Sperrzeitentreppen der Züge und

somit die Belegungszeiten der einzelnen Fahrwegelemente berechnet. So wird beispielsweise erreicht, daß kreuzende Zugfahrten noch möglich sind, was bei SIMU VII durch die Vorausbelegungen verhindert wurde.

Bei synchronen Verfahren besteht die Gefahr, in sogenannte Deadlock-Situationen zu gelangen. Falls solche Deadlocks auftreten, kann das Betriebsgeschehen beispielsweise nur durch Rückwärtsfahren eines Zuges gelöst werden. In der Realität können Deadlocks natürlich auch auftreten, sie werden jedoch im allgemeinen durch den Disponenten verhindert. Daher müssen bei synchronen Simulationsverfahren Deadlock-Situationen frühzeitig erkannt und ihr Auftreten durch entsprechende Dispositionsentscheidungen verhindert werden. In SIMU ++ werden Konflikte mit Zügen der Gegenrichtung ohne Beachtung der Zugprioritäten behandelt und gelöst, indem der erste Zug am letzten auf einem zweigleisigen Abschnitt gelegenen Bahnhof oder in einem mit freien Ausweichgleisen ausgestatteten vor dem Konfliktort liegenden Bahnhof in ein Ausweichgleis zur Kreuzung genommen wird [39].

Zum Abschluß der Simulation kann die statistische Auswertung von Mehrfachsimulationen mit dem Performance Evaluator erfolgen. Die Auswertungen sind mit denen von SIMU VII vergleichbar.

4.4 Asynchrone Verfahren

Beim asynchronen Verfahren werden die Züge nicht in Zeitschritten eingelegt sondern aufgrund ihrer Priorität. Dabei wird für das Fortschreiten der Simulation die Rangordnung der Züge als Grundlage verwendet. Man beginnt mit den Zügen der höchsten Hierarchiestufe, fährt dann mit der nächsten fort, bis man bei der niedrigsten Stufe angekommen ist. Für die Reihenfolge der Züge einer Hierarchiestufe werden unterschiedliche Ansätze in den verschiedenen asynchronen Verfahren eingesetzt, die in den nachfolgenden Abschnitten genauer beschrieben werden. Die Simulation ist dann beendet, wenn alle Züge konfliktfrei eingelegt wurden.

Die Züge werden mit ihrer Sperrzeitentreppe in den Fahrplan eingelegt, d. h. zusätzlich zur Fahrzeit werden auch die Belegungen der Gleis- und Weichenabschnitte durch die Züge berechnet. Dies geschieht entweder vor oder während der Simulation. Konflikte entstehen durch Überschneidung der Belegungen, die dann so gelöst werden, daß auf der Strecke eine behinderungsfreie Fahrt möglich ist. Dies wird durch die Berücksichtigung der Sperrzeitentreppen gewährleistet.

Die asynchronen Verfahren respektieren die Rangordnung der Züge exakt. Damit wird ein Betriebsgeschehen realistisch abgebildet, welches sich durch eine voraus-

schauende Disposition ergibt, d. h. sie bilden den Einsatz einer Rechnerunterstützten Zugüberwachung oder einer Betriebszentrale realitätsgetreu ab.

In der Grundform sind asynchrone Algorithmen blockierungsfrei, denn durch das asynchrone Einlegeverfahren ist sichergestellt, daß keine Deadlocks auftreten können.

4.4.1 STRESI

Das Simulationsmodell STRESI ist ein Vertreter der asynchronen Verfahren. Hierbei handelt es sich um das Simulationsverfahren aus der Programmfamilie SLS, welche seit 1985 zunächst am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen entwickelt wurde und nun durch die Ingenieurgesellschaft Schultze Wakob und Partner (ISW) weiterentwickelt und gewartet wird [95]. Neben dem Einsatz bei der Deutschen Bahn, die auch Auftraggeber für die Entwicklung war, wird STRESI im Rahmen von Gutachten von zahlreichen Ingenieurbüros sowie in der Lehre an verschiedenen Hochschulen eingesetzt. Mit STRESI ist sowohl eine Simulation der Fahrplanerstellung als auch des Betriebsablaufs zweigleisiger Strecken möglich.

Diesem Programm liegt eine streckenorientierte Infrastrukturabbildung zu Grunde. Hierbei werden zunächst die Daten (Vor- und Hauptsignale, Neigungswechsel, Geschwindigkeiten, …) der durchgehenden Hauptgleise anhand der Kilometrierung eingegeben. Die Betriebsstellen (Bahnhöfe, Abzweigstellen und Haltepunkte) werden in einer vereinfachten Form repräsentiert. Bei Bahnhöfen beschränkt man sich auf Standardbahnhöfe, bei denen der Anwender die Anzahl der Überholungsgleise und dann anschließend die Daten (Halteplatz, Fahrstraßenzugschlußstelle, Geschwindigkeit, …) für jedes einzelne Überholungsgleis einzugeben hat. Die Kilometrierungen der einzelnen Weichen werden hierbei nicht erfaßt. Durch die Angabe der Benutzbarkeit der Überholungsgleise und die Eingabe aller Fahrstraßenzugschlußstellen kann auf die exakten Weichenlagen verzichtet werden. Aufgrund der vereinfachten Darstellungsform der Bahnhöfe kann die Infrastruktur auch einer längeren Strecke in kurzer Zeit erfaßt werden, und die Aussagekraft der Simulationsergebnisse ist hinreichend genau.

Nach der Eingabe der Infrastruktur wird das zu simulierende Betriebsprogramm festgelegt. Die einzelnen Zugfahrten werden zu Modellzügen zusammengefaßt. Dies geschieht zum einen, um den Eingabeaufwand zu reduzieren, und zum anderen, um die Ergebnisse nach der Simulation zusammenfassen zu können. Die Modellzüge werden durch die Zugdaten und ihre Fahrplandaten charakterisiert. Zu den Zugdaten gehören unter anderen Triebfahrzeugbaureihe, Last, Länge, zulässige Geschwindig-

keit und Verspätungsniveau. Die Verspätungen werden dabei als exponential-verteilt angenommen und durch die Wahrscheinlichkeit für eine Verspätung sowie die mittlere Verspätung der verspäteten Züge eindeutig charakterisiert. Im Simulationsprogramm sind die Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramme für alle verfügbaren Triebfahrzeuge hinterlegt, mit denen die Beschleunigungsvorgänge exakt berechnet werden können. Die Fahrplandaten bestehen aus dem Laufweg des Zuges mit der Angabe der Verkehrshalte in den Betriebsstellen sowie der Abfahrtszeit des Zuges an seinem Laufweganfang. Alternativ zur exakten Zeitangabe kann insbesondere bei Güterzügen auch die Ganglinie angegeben werden. Neben den Verkehrshalten können in diesen Betriebsstellen noch Überholungshalte definiert werden, in denen dann während der Simulation der betreffende Zug überholt werden kann und darf. Bei Güterzügen werden Betriebshalte eingefügt, bei denen die Züge in den Simulationsphasen je nach Bedarf halten können. Durch die Angabe von Überholungs- und Betriebshalten kann gesteuert werden, in welchen Betriebsstellen die Züge überholt werden oder Betriebshalte einlegen können.

Zu Beginn der Simulation werden die Fahrzeiten und Sperrzeitentreppen vorausberechnet. Dies geschieht für alle Züge auf allen eingegebenen Laufwegalternativen, die sich aus den Angaben über mögliche Überholungs- und Betriebshalte ergeben. Da diese Berechnung relativ aufwendig ist, wird sie vor der eigentlichen Simulationsphase durchgeführt. Für die exakte Fahrzeitrechnung verwendet STRESI das genaue Δv-Schritt-Verfahren. Bei der Simulation können die Sperrzeitentreppen dann verwendet werden, um die Zugfahrten in den Fahrplan einlegen zu können.

Anschließend werden die Züge nach ihrer Rangordnung sortiert. Bei der Einlegereihenfolge der Züge einer Prioritätsstufe ist die Abfahrtszeit am Laufweganfang maßgebend. Ein neu einzulegender Zug wird dann vollständig von Laufweganfang bis zum Laufwegende in den Fahrplan eingelegt. Treten hierbei Konflikte auf, werden diese für den in Bearbeitung befindlichen Zug in zeitlicher Reihenfolge des Auftretens der Konflikte gelöst. So wird Zug für Zug einer Hierarchiestufe eingelegt und dann in die nächste Hierarchiestufe übergegangen.

Dieses Verfahren würde jedoch bei eingleisigen Strecken dazu führen, daß gegebenenfalls nach dem Einlegen der höherrangigen Züge in den Fahrplan kein Platz mehr für die niederrangigen Züge vorhanden ist, für die dann keine Trasse gefunden werden kann. Aus diesem Grund ist die Anwendung von STRESI auf zweigleisige Strekken beschränkt.

Die beiden Simulationsstufen der Fahrplanerstellung und Betriebsabwicklung werden nacheinander durchlaufen, mit dem Unterschied, daß vor der Simulation der Be-

triebsabwicklung Einbruchsverspätungen eingespielt werden. Die Verspätungen sind durch einen Zufallsgenerator aufgrund der Werte für das Verspätungsniveau für jede einzelne Zugfahrt der Modellzüge ermittelt worden und fließen in die Simulation der Betriebsabwicklung ein. Die Simulation wird nun mehrfach wiederholt, wobei für jeden Durchlauf neue Einbruchsverspätungen erzeugt werden. Mit dieser Methode lassen sich statistisch abgesicherte Ergebnisse erzielen. Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsläufe werden nach deren Abschluß zusammengefaßt. Zusätzlich wird neben diesen Ergebnissen eine minimal erforderliche Anzahl von Simulationsläufen aufgrund einer vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit ermittelt.

In STRESI können im Betriebsablauf nur Einbruchsverspätungen abgebildet werden. Urverspätungen, die auf der untersuchten Strecke auftreten, können durch das Modell nicht berücksichtigt werden. Bei der Programmerstellung war man davon ausgegangen, daß nur relativ kurze Strecken (bis 100 km) untersucht werden, und daß man dadurch auf die direkte Einspielung von Urverspätungen verzichten könne. Durch den Einsatz leistungsfähiger Rechner ist man heute in der Lage, auch längere Strecken zu simulieren, bei denen man dann auf die Urverspätungen im untersuchten Streckenabschnitt nicht mehr verzichten kann.

4.4.2 NSIM

Die asynchrone Vorgehensweise von STRESI ist in dem ebenfalls asynchron arbeitenden Verfahren NSIM (oder auch GSIM [89], [92]) weiter verfeinert und erweitert worden. Dieses Verfahren, von der Ingenieurgesellschaft Schultze Wakob und Partner (ISW) seit 1984 entwickelt und ständig erweitert, ermöglicht die Simulation der Fahrplanerstellung und der Betriebsabwicklung in Eisenbahnnetzen. NSIM wird kommerziell ausschließlich im Rahmen von Gutachten bei ISW eingesetzt.

NSIM verwendet jedoch eine andere Form der Infrastrukturabbildung als STRESI. Die Elemente des Gleisplans der betrachteten Infrastruktur werden zu Fahrwegelementen zusammengefaßt, solange gleiche Streckenmerkmale vorliegen. Für die exakten Abgrenzungsregeln der Fahrwegelemente sei auf [89] verwiesen. Die Aufteilung der gesamten Infrastruktur in die Fahrwegelemente muß vom Anwender selber vorgenommen werden. Modellintern werden diese Fahrwegelemente gegebenenfalls weiter in Belegungselemente unterteilt.

Das Betriebsprogramm wird ähnlich wie bei STRESI mit Modellzügen festgelegt. Auch in NSIM sind die Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramme der Triebfahrzeuge enthalten, so daß eine exakte Fahrzeitrechnung nach dem Δv-Schritt-Verfahren durchgeführt werden kann. Zusätzlich zu dem Hauptfahrweg muß der Anwender

noch weitere Fahrwegalternativen für jeden Modellzug definieren. Diese können dann während der Simulation verwendet werden, um Konflikte zu lösen.

Vor der Betriebssimulation führt NSIM eine Simulation der Fahrplanerstellung durch. Die Simulation des Betriebsablaufs wird dann analog zu STRESI entsprechend oft wiederholt, so daß gesicherte Aussagen über die Ergebnisse getroffen werden können.

Da NSIM nicht nur zweigleisige Strecken simulieren kann, sondern darüber hinaus auch größere Netze mußte der Einlegealgorithmus verfeinert und durch synchrone Elemente ergänzt werden, um insbesondere eingleisige Strecken besser disponieren zu können. Die Züge werden zwar weiterhin asynchron, aber nicht mehr über den gesamten Laufweg sondern abschnittsweise eingelegt. An den Abschnittsgrenzen, den sogenannten Brechpunkten, wird das Einlegen des Zuges unterbrochen. Diese Brechpunkte sind vom Anwender vorzugeben. Der einzelne Zug wird dann zwischen zwei Brechpunkten, die in der Regel in Überholungs- bzw. Kreuzungsbahnhöfen liegen, eingelegt. Hier wird das Einlegen dieses Zuges zunächst gestoppt. Dann wird überprüft, ob der Zug weiter eingelegt wird oder ein anderer Zug an der Reihe ist, d. h. hier ist dann nicht mehr die Abfahrtszeit am Anfang des Laufweges für die Einlegereihenfolge maßgebend, sondern auch die Abfahrtszeiten an den Überholungs- bzw. Kreuzungsbahnhöfen im weiteren Zuglauf. Das abschnittsweise Einlegen der Züge zwischen den Brechpunkten erfolgt nach dem Prinzip „first in/first out“, damit bei Konflikten die Lösung mit der geringsten Wartezeit realisiert werden kann [90].

Insgesamt werden reihum alle Züge einer Hierarchiestufe eingelegt, bis sie komplett im Fahrplan enthalten sind. NSIM ermöglicht so, nicht nur wie STRESI zweigleisige Strecken, sondern auch Teilnetze mit eingleisigen Abschnitten zu simulieren. Bei größeren Teilnetzen wird der Verwaltungsaufwand für das Einlegen der Züge jedoch recht hoch, da bei den Zügen vermerkt werden muß, bis wohin der Zug schon eingelegt worden ist. Außerdem muß die zeitliche Reihenfolge der Züge berücksichtigt werden, damit bestimmt werden kann, wann welcher Zug wieder an der Reihe ist, weiter eingelegt zu werden.

Da NSIM Netzteile betrachten kann, konnte man für die Reihenfolge beim Einlegen nicht die Abfahrtszeit wie bei STRESI verwenden, denn man muß auch eine Reihenfolge von Zügen festlegen, die auf unterschiedlichen Strecken fahren. Aus diesem Grunde sind die sogenannten Sortierquerschnitte eingeführt worden, und die Abfahrts- bzw. Durchfahrtszeit an diesen Punkten ist maßgebend für die Einlegereihenfolge.

Weiterhin ist die ausschließliche Berücksichtigung von Einbruchsverspätungen in Netzteilen nicht mehr sinnvoll. Daher wurde im Modell die Möglichkeit geschaffen, auch Urverspätungen einfließen zu lassen. Diese Urverspätungen werden bei NSIM im Halt berücksichtigt, indem die Haltezeit des Zuges verlängert wird.

Das Simulationsmodell NSIM bildet den Eisenbahnbetrieb in Netzteilen realistischer ab als STRESI. Bei der alleinigen Betrachtung zweigleisiger Strecken können die Abhängigkeiten zwischen den Strecken, die in den Knoten zusammengeführt werden, keine Berücksichtigung finden, da in STRESI die Knoten nicht exakt abgebildet sind. NSIM bietet neben dem Vorteil der detaillierten Modellierung der Knoten auch die Berücksichtigung von eingleisigen Strecken in dem simulierten Teilnetz. NSIM erfordert jedoch einen erfahrenen Bearbeiter, der die Infrastruktur korrekt in die benötigten Fahrwegelemente aufteilen kann. Weiterhin ist ein verhältnismäßig hoher Aufwand zur Eingabe der Fahrwegalternativen erforderlich, da diese für alle Modellzüge manuell erfaßt werden müssen.

4.4.3 BABSI

Am Verkehrswissenschaftlichen Institut wurde Anfang der 90er Jahre der sogenannte SPURPLAN-Graph zur Abbildung von Infrastrukturdaten entwickelt [12]. Dieser Graph war ursprünglich für die Feinkonstruktion von Fahrplänen mit FAKTUS verwendet worden. Aufgrund der guten Erfahrungen, die bei der Entwicklung der Fahrplankonstruktion gemacht wurden, entstand der Wunsch nach einer Eisenbahnbetriebssimulation auf der Basis des SPURPLAN-Graphen. Erste Schritte wurden hierzu im Rahmen einer Diplomarbeit unternommen [72]. Ein vollständiges neues asynchrones Simulationsverfahren BABSI (Bahnbetriebssimulation) wird in [35] entwikkelt.

Da der SPURPLAN-Graph bei der DB Netz AG in den letzten Jahren für die Konstruktion von Fahrplänen mit FAKTUS/RUT-0 verwendet wurde, sind mittlerweile die Infrastrukturdaten aller Haupt- und vieler Nebenstrecken in dem SPURPLAN-Graph-Datenformat aufgenommen worden. In dieser Modellierung sind auch alle für die Simulation notwendigen Infrastrukturelemente enthalten. Durch die Verwendung der gleichen Infrastrukturmodellierung können dann eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen unmittelbar durchgeführt werden, ohne vorher die Infrastruktur immer wieder neu eingeben zu müssen oder aber mehrere verschiedene Datensätze zu aktualisieren und zu ergänzen. Der SPURPLAN-Graph ist eine exakte und redundanzfreie Abbildung der Gleisinfrastruktur. Es können größere Netze mit umfangrei-

chen Knotenbahnhöfen sowie ein- und zweigleisige Strecken aufgenommen werden. BABSI kann somit wie NSIM auch größere Teilnetze simulieren.

Wie bei den anderen asynchronen Verfahren bereits beschrieben, sind in BABSI auch die beiden Phasen der Simulation der Fahrplanerstellung und der Simulation des Betriebsablaufs enthalten. Zunächst wird auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements die Planungsphase der Fahrplanerstellung nachgebildet und anschließend ein Nachweis über die Stabilität des zuvor konstruierten Fahrplans in der Betriebsabwicklung geführt. Durch die Wiederholung der Simulation des Betriebsablaufs mit jeweils verschiedenen einfließenden Störungen können statistisch gesicherte Ergebnisse über die Stabilität des Fahrplans gewonnen werden. Die Ergebnisse bei BABSI entsprechen im wesentlichen denen, die bereits bei STRESI und NSIM aufgeführt wurden.

4.5 Ansatz des Konsortiums für die BZ der DB Netz AG

In diesem Abschnitt soll kurz das Konzept des BZ-Konsortiums für die Konflikterkennung und -lösung vorgestellt und erläutert werden. Die Konflikterkennung und -lösung ist bislang in den Betriebszentralen noch nicht implementiert, so daß hier nur auf die vorhandene Literatur zurückgegriffen werden kann.

Zur Konfliktlösung müssen zunächst einmal die Konflikte erkannt werden. Hier werden in [34] und [46] die folgenden Konfliktarten unterschieden, die rechnerunterstützt erkannt werden sollen:

- Verhaltenskonflikt/Fahrplankonflikt
- Anschluß- / Umlaufkonflikt
- Belegungskonflikt

Ein Verhaltens- oder Fahrplankonflikt eines Zuges tritt auf, wenn eine Abweichung zwischen dem Ist- und der Sollfahrplan vorliegt, d. h. wenn durch die Zuglaufmeldungen erkannt wird, daß sich die tatsächliche Abfahrts- oder Durchfahrtszeit von der geplanten Abfahrts- oder Durchfahrtszeit unterscheidet. Ein Anschlußkonflikt liegt vor, wenn ein verspäteter Zug einen seiner Anschlußzüge nicht mehr erreicht bzw. der Anschlußzug warten muß. Ein Umlaufkonflikt ist ähnlich dem Anschlußkonflikt, jedoch auf Triebfahrzeug-, Wagen- oder Personalübergang und nicht auf Reisendenübergang bezogen. Belegungskonflikte beziehen sich auf die Überschneidung der Belegungen einzelner Gleisabschnitte. Sie werden noch zusätzlich in Überholungskonflikte, Kreuzungskonflikte und Zugfolgekonflikte differenziert.

Die Qualität der Konflikterkennung hängt unmittelbar von der Qualität der Prognoserechnung ab; hierbei führen Prognosen mit mangelhafter Qualität zu einer falschen Konflikterkennung [41]. Daher wird in der BZ keine Parallelverschiebung der Fahrplantrassen vorgenommen [34] sondern eine Online-Fahrzeitrechnung implementiert [46]. Für jede der obigen Konfliktarten wird eine eigene Konflikterkennung realisiert. Verhaltenskonflikte können hierbei unmittelbar durch den Soll-Ist-Vergleich ermittelt werden. Zur Erkennung von Anschluß- und Umlaufkonflikten wird auf die maximalen Wartezeiten aus der Wartezeitvorschrift zurückgegriffen. Die Erkennung von Belegungskonflikten geschieht hierbei mit auf der Basis der Fahrzeitrechnung ermittelten Mindestzugfolgezeiten [46], [47].

Nach der Konflikterkennung sollen die Konflikte visualisiert werden. Hierbei wird für jede Konfliktart eine eigene Darstellung verwendet. Die Darstellung von Belegungskonflikten geschieht mit Sperrzeitentreppen auf der Basis von Mindestzugfolgezeiten [41]. Die Zeit-Weg-Linien-Darstellung ist nach [41] nicht geeignet zur Visualisierung von Bahnhofsgleiskonflikten, Anschluß- bzw. Umlaufkonflikten, Kreuzungskonflikten sowie von Konflikten mit Rangierfahrten. Für die beiden ersten Konfliktarten ist dies sicherlich richtig, aber warum sollen Kreuzungskonflikte oder Konflikte zwischen Zug- und Rangierfahrten nicht in der Zeit-Weg-Linien-Darstellung angezeigt werden können? Diese Konflikte sind Belegungskonflikte, die auch in der Zeit-Weg-Linien-Darstellung mit Anzeige der Sperrzeitentreppen dargestellt und erkannt werden können.

Weiterhin sind für jede Konfliktart dispositive Maßnahmen im System hinterlegt und ein jeweils auf die Konfliktart zugeschnittener Konfliktlösungsalgorithmus implementiert. Nach [42] ist für die Praxis die kausale Konfliktlösung das am besten geeignete Modell. Bei der kausalen Konfliktlösung werden die Konflikte in ihrer zeitlichen Reihenfolge gelöst. Wenn es für den zeitlich ersten Konflikt mehrere Lösungsmöglichkeiten gibt, werden alle einzeln durchprobiert. Nach der Lösung dieses ersten Konflikts sind in der Regel noch weitere Konflikte vorhanden, die dann ihrerseits wieder mit mehreren Möglichkeiten durchprobiert werden. Dieses Verfahren wird solange wiederholt, bis entweder alle Konflikte gelöst wurden oder eine zeitliche Grenze erreicht wird, nach der keine Konflikte mehr gelöst werden. Durch die kausale Konfliktlösung wird ein Konfliktlösungsbaum aufgestellt, wobei jeder Weg von der Wurzel bis zum Blatt eine Kette von Lösungsmöglichkeiten darstellt. Hierbei ist natürlich auch jeweils eine eigene Prognoserechnung erforderlich, die einen erheblichen Rechenaufwand darstellt [42].

Im Gegensatz zur kausalen Konfliktlösung steht eine global optimierte Konfliktlösung, bei der versucht wird, nach bestimmten Kriterien ein Optimum zu finden. Dies könnte

beispielsweise mittels künstlicher Intelligenz erfolgen, wobei in [42] die Frage aufgeworfen wird, ob dieser Aufwand das Ergebnis rechtfertigt. In [34] werden auch Expertensysteme zur Konfliktlösung als problematisch dargestellt, da die Konfliktlösung in der Disposition Echtzeit-Anforderungen unterworfen ist.

Ein erster Einsatz einer rechnerunterstützten Konflikterkennung und -lösung war in der Pilotanwendung der BZ Magdeburg geplant. Hier sollte eine Konfliktlösung zum Einsatz kommen, die auf in Regeln gespeichertem Expertenwissen basiert [82]. Welche Funktionalitäten jedoch vor dem Zusammenschluß der Firmen zum BZ2000-Konsortium realisiert wurden, ist in der Literatur nicht dokumentiert.

Erste Ansätze einer Konflikterkennung und -lösung sind in KOBS (Kernsystem für eine optimierte Betriebssteuerung) enthalten. KOBS befindet sich in einer Pilotanwendung bei der MÀV in Ungarn im Einsatz [43]. Hier ist jedoch noch eine Erweiterung der Konflikterkennung und -lösung erforderlich [41].

Eine Konflikterkennung und -lösung durch eine dynamische Zuglenkung wurden in [78] entwickelt. Hierbei werden die Möglichkeiten der automatischen Fahrstraßeneinstellung moderner Stellwerke genutzt. Erkannte Konflikte können dann durch eine Veränderung der Reihenfolge der Züge, eine Veränderung der Abfahrtszeiten oder eine Suche nach alternativen Fahrstraßen gelöst werden. Dieses Verfahren wurde mittels eines Stellwerksimulators erfolgreich getestet. Das [78] vorgestellte Verfahren ist jedoch für den Einsatz in Elektronischen Stellwerken konzipiert, die jedoch nicht über die großräumige Sichtweise einer BZ verfügen.

Da die in der Literatur beschriebenen Algorithmen sich noch in der Implementierungs- bzw. Testphase befinden und bisher noch nicht in den Betriebszentralen eingesetzt werden, kann über die Qualität der Algorithmen keine abschließende Beurteilung vorgenommen werden. Die Fahrzeitrechnung und die dazu notwendigen Infrastrukturdaten entsprechen in ihrer Detaillierung denen der Fahrplankonstruktion und sind damit hinreichend genau. Inwieweit jedoch die Belegungselemente abgegrenzt und die Belegungszeiten exakt berechnet werden, kann noch nicht näher ermittelt werden. Nach [46] müssen Mindestzugfolgezeiten zur Erkennung von Belegungskonflikten berechnet werden. Jedoch ist mit Hilfe der Belegungselemente und deren Belegungszeiten eine direkte Ermittlung der Konflikte aufgrund der Überschneidungen von Belegungszeiten möglich. Daß dies bei KOBS nicht geschieht, läßt an der Genauigkeit der Belegungselemente zweifeln.

4.6 Andere Ansätze

In diesem Abschnitt sollen verschiedenartige Ansätze zur Dispositionsunterstützung erläutert und diskutiert werden. Da die Disposition des Eisenbahnbetriebes einen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt verschiedener Institute und Einrichtungen darstellt, sind neben den hier aufgeführten Ansätzen noch weitere Ansätze in der Entwicklung, die jedoch bis zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht publiziert sind. Beispielsweise ist hier das Projekt GADis zu nennen. Bei diesem durch die Deutsche Bahn geförderten Projekt sollen genetische Algorithmen für die Disposition entwickelt werden.

Auch die nachfolgenden Ansätze befinden sich zum größten Teil noch in der Entwicklungsphase. Zur Zeit ist noch kein Dispositionsverfahren bei einem Eisenbahninfrastrukturunternehmen im Einsatz, welches zur Dispositionsunterstützung in einem Eisenbahnnetz mit einem – wie in Deutschland auf Hauptstrecken üblichen – Verkehrsaufkommen verwendet werden kann. Lediglich ist für kleinere eingleisige Nebenbahnstrecken bereits RegiDisp (siehe 4.6.4) eingesetzt worden. Weiterhin ist eine Anwendung in den USA bekannt, wobei jedoch die dortigen Betriebsverhältnisse nicht mit hiesigen vergleichbar sind. Bei dieser Anwendung in den USA sind vorwiegend längere eingleisige Strecken mit wenigen Kreuzungsmöglichkeiten und eine geringe Zugdichte vorherrschend, so daß hier nur wenige Konfliktlösungsmöglichkeiten zur Auswahl stehen. Dieses Verfahren läßt sich nicht auf mitteleuropäische Verhältnisse übertragen, so daß für hiesige Betriebsverhältnisse neue Verfahren entwikkelt werden müssen.

4.6.1 Regelbasierte Zuglenklogik für Zuglenkanlagen

In [76] wird von PACHL eine regelbasierte Zuglenklogik für die Steuerung von automatischen Zuglenkanlagen vorgestellt. Eine Automatisierung der Zuglenkung wurde zunächst nur bei Bahnen eingeführt, die nach einem starren Taktfahrplan verkehren sowie über eine festgelegte Reihenfolge der einzelnen Zugfahrten verfügen. Bei Eisenbahnen, die mit höherer Wahrscheinlichkeit von dem vorgegebenem Fahrplan abweichen, sind deutlich aufwendigere Verfahren erforderlich. Die in [76] erstellte Zuglenklogik ist durch Einbindung von Strategien zur Konflikterkennung und -lösung auch bei einem stochastischen Betriebsablauf anwendbar.

Diese regelbasierte Zuglenklogik beinhaltet insbesondere Verfahren zur Deadlock-Vermeidung. Der Betriebsablauf von Eisenbahnen ist bei eingleisigen Strecken grundsätzlich deadlock-anfällig. Bei der Fahrplanerstellung wird ein konfliktfreier, also

insbesondere auch deadlock-freier Fahrplan erstellt. Allerdings können bei Abweichungen vom Fahrplan Deadlock-Situationen auftreten, die mit Hilfe einer übergeordneten Disposition vermieden werden müssen. Die von PACHL entwickelte Deadlock-Vermeidung basiert auf einer Analyse der Wartekettenstruktur im Eisenbahnnetz. Hierbei wird vor jeder Zulassung einer Zugfahrt geprüft, ob die daraus resultierende Belegungsänderung zum Schließen einer Wartekette und damit zu einem Deadlock führt. Diese Warteketten werden aufgrund der zwischen den Zügen wirkenden Ereignisfolgeabhängigkeiten aufgebaut. Falls beim Prüfen einer Zugfahrt eine geschlossene Wartekette auftritt, darf diese nicht zugelassen werden, d. h. der Zug muß an seiner derzeitigen Position warten, bis die Deadlock-Gefahr durch Veränderung der übrigen Zugpositionen nicht mehr gegeben ist.

Damit eine behinderungsfreie Fahrt der Züge gewährleistet ist, muß die Fahrstraße bereits eingestellt sein und das Vorsignal „Fahrt erwarten“ anzeigen, wenn sich der Zug im Sichtabstand vor dem Vorsignal befindet. Dazu definiert man für jede Fahrstraße einen sogenannten Einstellanstoßpunkt. Wenn sich der Zug an diesem Punkt befindet, wird (wenn möglich) die Fahrstraße eingestellt.

Neben der Deadlock-Vermeidungsstrategie tritt beispielsweise an Einfädelungsweichen das Problem der Reihenfolgeregelung auf. Ohne weitere Bedingung würde der erste Zug, der den betreffenden Einstellanstoßpunkt erreicht, den Vorrang erhalten. Damit hier Vorrangregelungen definiert werden können, wird ein weiter zurückliegender Punkt, der sogenannte Fahrstraßenanforderungspunkt festgelegt. Nach Befahren dieses Punktes wird die entsprechende Fahrstraße für den Zug reserviert, aber noch nicht eingestellt. Werden gleichzeitig mehrere Fahrstraßen angefordert, die nicht miteinander vereinbar sind, so wird gemäß einer Prioritätsregel festgelegt, welcher Zug den Vorrang erhält.

Die von PACHL entwickelte regelbasierte Zuglenklogik für die Steuerung von automatischen Zuglenkanlagen für Bahnen mit stochastischem Betriebsablauf ist für den Einsatz in den Zuglenkanlagen größerer Stellwerke konzipiert. Neben dieser Anwendung könnte das Verfahren auch in der Rechnerunterstützen Zugüberwachung bzw. in der Betriebszentrale eingesetzt werden, um die Disponenten auf einen drohenden Deadlock rechtzeitig vor Eintreten der Blockierung hinzuweisen.

4.6.2 Wissensbasierte Entscheidungsunterstützung

Eine wissensbasierte Entscheidungsunterstützung wird von FAY in [29] konzipiert. Ein solches System arbeitet nach den in der Wissensbasis gespeicherten Dispositionsregeln. Zum Anreichern der Wissensbasis wurden die Konflikte, die in umfangrei-

chen Studien erkannt worden sind, analysiert und klassifiziert. Insgesamt ergaben sich 16 verschiedene Konfliktarten, die gegebenenfalls noch weiter unterteilt wurden ([29], Anhang 1). Beispielsweise werden die „gleichzeitige Beanspruchung eines Streckengleises“, „Weiche im Bahnhof kommt nicht in Stellung“, „Weiche kommt nicht in Stellung“ oder „Fehlhandlung des Weichenstellers“ als Konfliktart definiert. Dabei erscheint die Abgrenzung der Konfliktarten teilweise recht willkürlich, und was unter einer Fehlhandlung des Weichenstellers zu verstehen ist, wird auch nicht klar.

Für die Konfliktlösung wurden Dispositionsmaßnahmen durch Befragen der Disponenten ermittelt und zu insgesamt ca. 120 Regeln zusammengefaßt, durch deren Anwendung auf die klassifizierten Konfliktsituationen mögliche Maßnahmen gefunden werden. Zusätzlich werden noch weitere Randbedingungen definiert, die für alle oder einzelne Zugfahrten maßgebend sind. Da viele der Regeln eine gewisse Unschärfe besitzen, müssen neben den scharfen Regeln auch unscharfe Regeln berücksichtigt werden können. Ein Petrinetz stellt dabei die Regelbasis dar, und mittels Fuzzy-Logik wird die gewünschte Unschärfe erreicht. Die Zusammenfassung beider Ansätze ergibt ein Fuzzy-Petrinetz, welches hier zur Anwendung kommt.

Zur Vorhersage von Konflikten muß eine ständige Vorausschau auf den zukünftigen Betriebsablauf vorhanden sein. FAY verwendet zur Simulation ein vereinfachtes Verfahren, welches auf (aus der Erfahrung bekannten oder mit genauen Simulationen offline berechnete) Fahrzeiten für einzelne Dispositionsabschnitte zurückgreift, und nur im Falle von durch Störungen veränderten Zugparametern müssen einzelne Abschnitte neu simuliert werden [29]. Die Infrastruktur wird hierbei als Graph abgebildet, bei dem die Knoten die Stationen und die Kanten die Gleise darstellen. Die Kanten haben entsprechende Attribute wie z. B. Länge und Maximalgeschwindigkeit.

Diese zeitsynchrone Simulation bildet die einzelnen Zugfahrten ereignisorientiert ab. Bei der Simulation kommt es weniger auf das Fahrverhalten auf der Strecke, sondern vor allem auf die Ankunftszeiten in den Stationen an [29]. Während dieser Simulation werden einfache Verspätungs- und Belegungskonflikte bereits automatisch behandelt [29].

Was hier in diesem Zusammenhang jedoch einfache Verspätungs- und Belegungskonflikte sind und wie diese unmittelbar bei der Simulation gelöst werden, geht aus der Arbeit von FAY nicht hervor. Insbesondere existiert keine Abgrenzung dieser einfachen Konflikte gegenüber den Konflikten, die das wissensbasierte System lösen soll. Weiterhin ist unklar, ob diese vereinfachte Simulation ausreichend ist, um Belegungskonflikte, die beispielsweise als Auflaufkonflikt auf den Strecken auftreten, hinreichend genau zu erkennen und zu lokalisieren. Über die im System vorhandene

Konflikterkennung macht FAY keine Aussage. Ein Nachteil der wissensbasierten Systeme ist, daß nur auf das vorhandene Wissen der befragten Personen zurückgegriffen werden kann und somit die Qualität des Systems entscheidend von der Auswahl dieser Personen abhängt.

Dieses wissensbasierte Dispositionssystem wurde im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts „DISPOS“ entwickelt und zunächst beispielhaft für das Magnetschnellbahnsystem TRANSRAPID als Labormuster realisiert. FAY hat nun die Ergebnisse dieser Arbeiten auf andere Bahnsysteme übertragen. Ob jedoch die komplexen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten des Eisenbahnverkehrs unter Realzeit-Bedingungen durch ein wissensbasiertes Dispositionssystem beherrschbar sind, muß sich erst in der Zukunft zeigen.

4.6.3 Steuerung durch dezentrale autonome Agenten

In [30] wird von FAY ein Ansatz für die dezentrale Steuerung durch autonome („intelligente“) Agenten entwickelt. Die Steuerung des Betriebes soll durch sogenannte T-Agenten und F-Agenten durchgeführt werden, die allesamt autonom agieren können. Bei den T-Agenten handelt es sich um Transportwunsch-Agenten, die den Auftrag übernehmen, einen Transportwunsch eigenständig zu realisieren. Die F-Agenten sind Fahrwegabschnitt-Agenten und repräsentieren die zugrundeliegende Infrastruktur.

Für eine Zugfahrt ermittelt der T-Agent des Fahrzeugs zunächst über eine zu erstellende Infrastrukturabbildung eine oder mehrere Routen vom Start- zum Zielbahnhof. Aus der Infrastrukturabbildung ist dann abzuleiten, über welche Fahrwegabschnitte die jeweilige Route führt und damit, welche F-Agenten jeweils zuständig sind. Der T-Agent des Fahrzeugs kontaktiert nun die entsprechenden F-Agenten über eine Kommunikationsverbindung und reserviert den F-Agenten jeweils für den erforderlichen Zeitraum, so daß dieser F-Agent in dieser Zeitspanne für andere Fahrzeuge gesperrt ist. Die F-Agenten melden die erfolgte Reservierung bzw. die Ablehnung des Reservierungswunsches an den T-Agenten zurück. Falls der T-Agent von allen erforderlichen F-Agenten eine positive Rückmeldung erhalten hat, kann er die Fahrt durchführen. Im Falle der Ablehnung auch nur eines F-Agenten muß die Prozedur für eine mögliche Alternativroute erneut durchgeführt werden.

Die dezentralen T-Agenten und F-Agenten handeln hierbei autonom. Da die einzelnen T-Agenten von den Fahrtwünschen der übrigen T-Agenten nichts wissen, können die autonomen Agenten sich auch untereinander nicht koordinieren. Die dezentrale Steuerung verfügt natürlich auch über keine zentrale Steuerungslogik, die die

Zugfahrten untereinander koordinieren könnte. Je nach Reihenfolge der Reservierungswünsche der T-Agenten werden die F-Agenten für eine gewisse Zeitspanne an die T-Agenten vergeben.

Dieser Ansatz steht im Gegensatz zum heutigen Bestreben, die Zugfahrten von einer zentralen Stelle aus zu koordinieren. Erst durch eine zentrale Disposition in der Betriebszentrale ist eine Koordination sämtlicher Fahrtwünsche möglich. Die dezentrale Vorgehensweise entspricht dem „Fahren aus Sicht des Lokführers“. Da auf den Triebfahrzeugen keine Information über die restlichen Fahrzeugbewegungen vorhanden ist, können diese bei den eigenen Fahrtwünschen auch nicht berücksichtigt werden. Dadurch wird noch nicht einmal die Sichtweise der Fahrdienstleiter erreicht, die über die Zugfahrten in ihrem Bereich Bescheid wissen und somit zumindest eine Grundlage für Dispositionsentscheidungen in dem betreffenden Stellbezirk haben. Jedoch erst durch die Zusammenfassung der Informationen an einem zentralen Ort (beispielsweise der Betriebszentrale) kann eine Disposition auch weiträumige Konsequenzen der getroffenen Entscheidungen beurteilen.

Ein weiteres Problem stellt die Vermeidung von Deadlock-Situationen dar. Durch die autonom agierenden T-Agenten können auf eingleisigen Strecken Deadlocks hervorgerufen werden. Diese lassen sich jedoch nur mit Hilfe einer übergeordneten Disposition frühzeitig erkennen, die einen Überblick über alle zur Zeit aktiven T-Agenten und deren aktuelle Position besitzt.

4.6.4 RegiDisp

Eine rechnerunterstützte Disposition bei betrieblichen Konflikten wurde von KOCH in [59] entwickelt. Das System RegiDisp wurde vom BMBF gefördert und ist speziell auf die Erfordernisse im Regionalverkehr abgestimmt. Ausgehend von einem gestörten Fahrplan versucht der Algorithmus, den „besten“ konfliktfreien Fahrplan zu finden. Der Algorithmus durchläuft alle Lösungen für den ersten Konflikt. Falls bei der Lösung des primären Konflikts weitere Konflikte entstehen, werden für diese sekundären Konflikte ebenfalls alle möglichen Lösungen sukzessive durchprobiert, bis alle Konflikte gelöst sind. Aufgrund dieser Vorgehensweise entsteht eine vollständige Auflistung aller Konfliktlösungsmöglichkeiten. In diesem Lösungsbaum wird die günstigste Lösung anhand einer gewichteten Summe von Verspätungen in allen Bahnhöfen ausgewählt. Hierbei werden Anschlußverluste in Zeiten ausgedrückt und zur Summe hinzugefügt.

Dieses Verfahren entspricht einer synchronen Simulation ohne Fahrzeitrechnung. Es wird also immer mit der Regelfahrzeit gerechnet und die Zeit-Weg-Linien bei Verspä-

tung parallel verschoben. Die Hierarchien der Züge sollen beachtet werden, jedoch wird nicht klar, wie dies realisiert werden soll. Auch ist keine Deadlock-Vermeidungsstrategie implementiert, die bei synchronen Verfahren zwingend erforderlich ist. Auch werden keine Sperrzeiten für die einzelnen Belegungselemente berechnet, mit denen dann eine Konflikterkennung exakt möglich wäre. Konflikte werden ausschließlich anhand der Ankunfts- und Abfahrtszeiten in den Kreuzungsbahnhöfen erkannt.

Bisher ist RegiDisp für wenig befahrene Nebenbahnstrecken der Dürener Kreisbahn und der Hohenzollerischen Landesbahnen angewendet worden. Hier liegen vereinfachte Verhältnisse vor, beispielsweise besitzen im wesentlichen alle Züge die gleichen Zugparameter, so daß sich keine Geschwindigkeitsunterschiede ergeben sowie alle Züge gleiche Fahrzeiten haben. Weiterhin besteht die Infrastruktur aus einer eingleisigen Strecke mit Kreuzungsbahnhöfen. Aufgrund dieser Betriebsverhältnisse wirken sich die oben erwähnten Vereinfachungen sicherlich nicht negativ aus, jedoch ist das System RegiDisp für komplexere Ausgangssituationen nicht einsetzbar.

4.6.5 Lineare Optimierung

In [70] und [71] wird von MARTIN ein Verfahren zur Disposition mittels Linearer Optimierung vorgestellt. Zunächst soll eine kurze Definition gegeben werden, was unter der Linearen Optimierung verstanden wird (aus [69]):

> Ein lineares Optimierungsproblem ist eine Extremwertaufgabe mit Nebenbedingungen. Eine lineare Funktion (Zielfunktion) von mehreren Veränderlichen ist unter Berücksichtigung linearer Gleichungen und Ungleichungen als Nebenbedingungen zu maximieren. Von allen Lösungen eines Systems mehrerer linearer Gleichungen und linearer Ungleichungen ist also eine solche Lösung zu bestimmen, für die der Funktionswert der Zielfunktion optimal ist.

Die Lineare Optimierung wird häufig zur Lösung praktischer Fragestellungen in Industrie und Wirtschaft eingesetzt. Daher existieren auch bereits eine ganze Reihe von Lösungsmethoden für die Lineare Optimierung, beispielsweise der Simplexalgorithmus. Diese Methoden lassen sich relativ leicht auf einem Rechner implementieren. Die Rechenzeit zur Lösung ist stark abhängig von der Anzahl der Nebenbedingungen, es wird aber auch immer die optimale Lösung unter den vorgegebenen Randbedingungen gefunden.

Das von MARTIN entwickelte Modell besteht aus einer Zielfunktion, den Wichtungsfaktoren sowie Nebenbedingungen. Für die Zielfunktion bestehen prinzipiell mehrere Alternativen. Dies kann zum einen die Pünktlichkeit oder die Flüssighaltung des Betrie-

bes oder zum anderen die Minimierung der Zahl der folgeverspäteten Züge sein. Bei der letzten wird einer Lösung der Vorzug gegeben, bei der ein Zug 10 Minuten Verspätung erhält gegenüber einer alternativen Lösung, bei der zwei Züge je 5 Minuten Verspätung erleiden. Begründung von MARTIN ist dafür, daß im ersten Fall weniger Reisende betroffen sind.

Die Wichtungsfaktoren werden zur Zielfunktion der Pünktlichkeit verwendet und definieren zuggattungsspezifische Kosten, um die Verspätungsminuten unterschiedlich zu wichten. MARTIN verwendet hierzu Werte, die von 17 DM pro Verspätungsminute für einen Nahverkehrszug bis zu 189 DM pro Verspätungsminute für einen IC reichen.

Den dritten Grundbestandteil des Dispositionsmodells stellen die Nebenbedingungen dar. Die rekursive Berechnung der Abfahrts- und Durchfahrtszeiten wird durch diese Nebenbedingungen realisiert. In dem Modell von MARTIN werden konstante Fahrzeiten für diese Berechnung angenommen. Die Fahrdynamik des Anfahrens und Bremsens wird durch ebenfalls konstante Anfahr- und Bremszeitzuschläge modelliert. Auch die Wechselwirkungen der Signal- und Sicherungstechnik wird durch sogenannte „Fahrtwechselzeiten“ abgedeckt, aus denen dann die Nebenbedingungen generiert werden. Weitere Nebenbedingungen stellen die Dispositionskriterien dar, die nicht als Wichtungsfaktoren eingehen. Auch Triebfahrzeug- oder Personalumläufe werden durch Nebenbedingungen abgebildet.

Das Dispositionsverfahren generiert zunächst aus allen aufgestellten Bedingungen ein lineares Gleichungssystem. Mit Hilfe einer rechnerunterstützten Linearen Optimierung wird dieses zunächst mit der Zielfunktion der Pünktlichkeit gelöst. Je nach dem Ausgang dieser Optimierung wird bei Überschreiten eines Schwellwertes die Zielfunktion der Flüssighaltung des Betriebes aktiviert und die Lineare Optimierung erneut mit dieser Zielfunktion durchgeführt. Zum Abschluß erfolgt die Optimierung mit der Zielfunktion zur Minimierung der folgeverspäteten Züge. Bei dieser Linearen Optimierung wird die ursprüngliche Zielfunktion als Nebenbedingung verwendet, so daß keine schlechteren Lösungen gefunden werden. Das Ergebnis der Optimierung sind die Abfahrts- oder Durchfahrtszeiten aller Züge an allen Zielorten. Dabei wird eine Lösungsvariante gewählt, bei der eine minimale Verspätung mit wenig betroffenen Zügen vorliegt.

Dieses Verfahren wurde anhand einer einfachen Beispielsituation durchgeführt. In diesem Beispiel mit nur 5 Zügen entstand ein Gleichungssystem mit 70 bis 90 Gleichungen. Gemäß MARTIN ist die Lineare Optimierung prinzipiell geeignet, und die Rechenzeit ist akzeptabel. Jedoch sind bei diesem Verfahren bisher die Beschleuni-

gungs- und Bremsvorgänge nur mit konstanten Zuschlägen berücksichtigt, d. h. es findet keine exakte Fahrzeitrechnung gemäß einer Infrastrukturmodellierung und der tatsächlichen Zugdaten (z-v-Diagramm, Last, …) statt. Es ist sicherlich möglich, wie MARTIN erwähnt, dies in das Modell zu integrieren, jedoch steigt dadurch die Anzahl der Gleichungen deutlich an.

Das Dispositionsverfahren berücksichtigt auch keine alternativen Fahrwege. Es werden grundsätzlich immer die Standardlaufwege der Züge verwendet, denn die planmäßigen Zielorte werden grundsätzlich erreicht [71]. Des weiteren ist bisher noch keine Deadlock-Erkennung im Modell enthalten. Dies ist jedoch für die mathematischen Modelle zwingend erforderlich.

Prinzipiell sind die mathematischen Modelle der Linearen Optimierung für die Disposition interessant. Bieten sie doch eine geschlossene Lösung und eine Optimierung nach frei vorgegebenen Zielfunktionen. Allerdings ist bislang noch kein vollständiges Modell entwickelt worden, welches alle Randbedingungen exakt abbildet. Die Lükken, die zur Zeit im Modell von MARTIN noch enthalten sind, können wohl ausgemerzt werden. Jedoch bleibt offen, ob die Anzahl der Gleichungen, die bei der Linearen Optimierung berücksichtigt werden müssen, wenn alle Randbedingungen einfließen, nicht explodiert.

Ein weiterer Nachteil dieser mathematischen Modelle liegt darin, daß sie zwar eine Konfliktlösung aber keine explizite Konflikterkennung beinhalten. Die Konflikterkennung ist durch die Gleichungen bei der Linearen Optimierung implizit vorhanden und die Konfliktlösung berücksichtigt dies auch, jedoch bietet sich keine Möglichkeit die sich anbahnenden Konflikte zu visualisieren. Es werden hierbei lediglich die Restriktionen ausgegeben, welche bei der Lösung nicht erfüllt werden konnten. Dies ist für ein Assistenzsystem, welches den Disponenten bei seiner Arbeit unterstützen soll, insofern ungünstig, da dem Disponenten die Konflikte, die durch das System gelöst werden, nicht explizit angezeigt werden können.

4.6.6 Numerische Simulation

In [10] wird von BLENDINGER/MEHRMANN/STEINBRECHER/UNGER eine mathematische Modellierung eines fahrplanbasierten Eisenbahnbetriebes vorgeschlagen. Hierbei sollen Methoden der numerischen Simulation für eine Optimierung des Zugbetriebes in einem komplexen Schienennetz eingesetzt werden.

Zunächst werden in [10] die Gleichungen zur Betrachtung einer Zugfahrt aufgestellt, so daß für eine einzelne Zugfahrt die Fahrzeitrechnung durchgeführt werden kann.

Im Anschluß daran werden die Abhängigkeiten zwischen mehreren Zugfahrten über die Signal- und Sicherungstechnik vorgestellt. Die auftretenden Konflikte werden gelöst, indem die Züge grundsätzlich gestutzt werden. Dieses simulierte Betriebsgeschehen entspricht einem Zustand ohne Disponenten, der auf den Betriebsablauf Einfluß nimmt, und ist vergleichbar mit einer synchronen Simulation, wobei alle Züge die gleiche Hierarchie besitzen.

In dem Verfahren, welches sich zur Zeit noch in der Entwicklung befindet, sind bislang noch keine Dispositionsregeln enthalten; auch ist noch nicht beschrieben, wie der Fahrplan anschließend optimiert werden soll. Da hier auch keine zugrundeliegende Infrastrukturabbildung vorhanden ist, bleibt die Frage offen, woraus die Restriktionen für die Zugfahrten (maximale Geschwindigkeiten, …) gebildet werden. Denn insbesondere bei der Verwendung von alternativen Fahrwegen müssen diese Restriktionen neu aufgestellt werden.

Da dieses Verfahren noch in der Entwurfsphase ist, bleibt abzuwarten, ob die hier entwickelten Methoden der numerischen Simulation für den Einsatz zur Dispositionsunterstützung geeignet sind.

5 Konzeption eines neuen Dispositionsverfahrens

Bei der Konzeption eines Dispositionsverfahrens sind ebenso wie bei der Fahrplankonstruktion und weiteren eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren die betrieblichen Besonderheiten der Eisenbahn zu beachten. Grundlage muß eine möglichst exakte Abbildung der Realität sein. Hier sind neben den Infrastrukturgegebenheiten auch die fahrdynamischen Prozesse der Züge zu nennen. Weiterhin müssen die signal- und sicherungstechnischen Voraussetzungen der Infrastruktur genau abgebildet werden. Dazu müssen die Zugfahrten nicht nur anhand ihrer Zeit-Weg-Linie sondern auch mit ihren Sperrzeitentreppen betrachtet werden. Die Sperrzeitentreppen ergeben sich unmittelbar aus der Signal- und Sicherungstechnik.

Dieser sperrzeitenbasierte Ansatz hat sich bei eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren seit vielen Jahren bewährt und durchgesetzt. Hier sind beispielsweise die analytischen Verfahren zur Berechnung der Leistungsfähigkeit ALFA, STRELE und ANKE oder auch die Simulationsverfahren STRESI und NSIM zu nennen. Seit einigen Jahren werden auch die Fahrpläne mit Hilfe von FAKTUS/RUT-0 erstellt. Bei diesem Verfahren werden die Sperrzeiten zur Konflikterkennung verwendet. Alle genannten Verfahren sind mittlerweile als Standard bei der DB Netz AG im Einsatz.

Bevor das Konzept für das neue Dispositionsverfahren vorgestellt wird, werden zunächst die Schwachstellen bisheriger bei der Zuglaufdisposition eingesetzter rechnerunterstützter Systeme vorgestellt. Im anschließenden Abschnitt wird dann die Grundidee des neuen Dispositionsverfahrens erläutert, und im folgenden wird dann auf die Grundlagen dieses Verfahrens hingewiesen.

5.1 Schwachstellen der bisher eingesetzten Systeme

Um eine Rechnerunterstützung bei der Disposition zu realisieren, müssen die aktuellen Zuglaufdaten der Züge im Dispositionsrechner bekannt sein. So waren die ersten rechnerunterstützten Anwendungen darauf angewiesen, die Zuglaufdaten aus den Stellwerken abzugreifen und über eine Datenleitung an eine zentrale Stelle zu übertragen. Erst dann können diese Zuglaufdaten entsprechend aufbereitet werden und den Disponenten in graphischer Form auf Monitoren visualisiert werden. Dies ist mit der Einführung der RZü für die Hauptstrecken der DB Netz AG realisiert worden. Jedoch ist hier noch keine Konflikterkennung und -lösung implementiert. In den ZWL-Darstellungen können auch keine Sperrzeitentreppen angezeigt werden, mit denen

der Disponent Konflikte zumindest optisch erkennen konnte. Daher mußte der Disponent die Konflikte anhand der Zeit-Weg-Linien der Züge abschätzen.

In den Betriebszentralen der DB Netz AG wird es mittels der neuen Software möglich, zusätzlich zu den Zeit-Weg-Linien auch Sperrzeitentreppen anzuzeigen. Bei diesen Sperrzeitentreppen handelt es sich jedoch um blockabschnittsbezogene Sperrzeitentreppen, die nur die einzelnen Blöcke darstellen und nicht die feine Abstufung auf einzelne Belegungselemente erreichen. Hier können zwar Konflikte auf der freien Strecke einigermaßen exakt bestimmt werden, jedoch um auch Konflikte in Fahrstraßenknoten zu ermitteln, ist eine detailliertere feingliedrigere Sperrzeitentreppe erforderlich.

Des weiteren ist erstmals in den BZ eine Fahrzeitrechnung enthalten, mit der die Fahrzeiten der Züge berechnet werden können. Bisher war die Prognose der Zeit-Weg-Linie für die Zukunft eine Parallelverschiebung der geplanten Zeit-Weg-Linie. Da jedoch im Verspätungsfall von den Triebfahrzeugführern die kürzeste Fahrzeit angestrebt wird, war die Prognose, je weiter man in die Zukunft blickte, relativ ungenau. Ein weiteres Manko, welches auch in der BZ noch besteht, ist die Tatsache, daß mit den Zugparametern (Tfz-Baureihe, Last, Länge, …) aus dem Trassenmanagement weitergearbeitet wird. Hier ist es jedoch erforderlich, die tagesaktuellen Zugparameter aus den Daten der Eisenbahnverkehrsunternehmen zu erhalten und dann auch in der Fahrzeitrechnung zu verwenden. Denn ohne die tatsächlichen Zugparameter wird die Prognose der Fahrzeitrechnung nicht der Realität entsprechen.

Eine weitere Möglichkeit, die Qualität der Prognoserechnung zu verbessern, liegt in einer „lernenden Fahrzeitrechnung“. Hierbei kann das bisherige Fahrverhalten der Züge genutzt werden, um hieraus Hinweise auf das zukünftige Verhalten ableiten zu können. Wenn ein Zug ständig langsamer fährt als aufgrund der Prognoserechnung berechnet, so kann vermutet werden, daß dieses Verhalten auch in der Zukunft beibehalten wird, beispielsweise aufgrund von höherer Last oder Ausfall eines Triebkopfes beim ICE. Mittels Analyse des bisherigen Fahrtverlaufs der Züge kann somit auch eine Verbesserung der Prognose erreicht werden.

Eine weitere Unsicherheit für die Prognose der Zeit-Weg-Linie stellt die recht grobe Ortung der Züge dar. Aufgrund der eingesetzten Technik (Abgreifen der Zuglaufmeldungen vom ZLV-Bus) ist eine Ortung der Züge nur an bestimmten Stellen des Netzes, nämlich kurz nach den Signalstandorten, genauer an den Stellen, an denen das betreffende Signal auf Halt fällt, möglich. Bei größeren Blockabständen kann es also sein, daß die Betriebszentrale mehrere Minuten lang die Positionen der Züge nur vermutet. Dieses Problem läßt sich jedoch erst beheben, wenn neuere Signaltechnik

(z. B. ETCS) oder modernere Kommunikationswege (z. B. GSM-R) zur Verfügung stehen.

5.2 Grundidee des neuen Verfahrens

In diesem Abschnitt soll nun die Grundidee des neuen Ansatzes zur Disposition vorgestellt werden. Grundlegend neu ist der Ansatz, Methoden des Trassenmanagements für die Betriebsdurchführung anzupassen und anzuwenden. Die Grundlage für die Betriebsdurchführung ist ein von den Trassenmanagern erarbeiteter Fahrplan. Durch die Rechnerunterstützung mittels FAKTUS/RUT-0 hat dieser auch eine hohe Qualität, was insbesondere die Konfliktfreiheit bis hinunter zu den einzelnen Belegungselementen angeht. Solange keine Störungen oder Fahrplanabweichungen auftreten, kann dieser Fahrplan, auch ohne Konflikte neu zu erzeugen, im Betriebsablauf umgesetzt werden. Falls Unregelmäßigkeiten im Betriebsgeschehen eintreten, wird während des laufenden Betriebes ein neuer, wiederum konfliktfreier Fahrplan erstellt.

In Abb. 15 wird diese Vorgehensweise anhand eines Ablaufdiagramms erläutert, die von SCHWANHÄUßER als Patent angemeldet worden ist [93]. Zu Beginn des Verfahrens wird der im Rahmen des Trassenmanagements erarbeitete konfliktfreie Fahrplan als Grundlage für den Betriebsablauf verwendet. Dieser Dispositionsfahrplan wird dann als Sollfahrplan ständig mit dem Ist-Fahrplan, der sich aufgrund der aktuellen Betriebslage ergibt, verglichen. Hierzu werden die eintreffenden Zuglaufmeldungen verwendet, mit denen der Soll-Ist-Vergleich stattfinden kann. Wenn durch diesen Soll-Ist-Vergleich Abweichungen festgestellt werden, die über ein vorgegebenes Maß hinausgehen, wird ein neuer Dispositionsfahrplan konstruiert. Dieser neue, ebenfalls konfliktfreie Dispositionsfahrplan ersetzt den bisherigen und wird zum neuen Soll-Fahrplan. Dann beginnt das Verfahren erneut mit dem Soll-Ist-Vergleich.

Die Konstruktion eines neuen Fahrplans kann beispielsweise nach den gleichen Regeln und Lösungsstrategien wie im Trassenmanagement durchgeführt werden. Alternativ können auch abweichende Regeln angewendet werden. Von Bedeutung ist jedoch, daß der Fahrplankonstruktionsprozeß in sehr kurzer Zeit abgeschlossen werden kann. Da jedoch ein schon erstellter Fahrplan die Grundlage für die neuen Dispositionsfahrpläne ist, müssen auch nur die durch die Störung unmittelbar bzw. im weiteren Verlauf betroffenen Züge neu einkonstruiert werden, während die übrigen, unbeteiligten Züge nicht angefaßt werden müssen. Auch ist es lediglich erforderlich, den Dispositionsfahrplan nur für eine gewisse Zeit im voraus zu erstellen, da in der

Zukunft noch weitere Störungen auftreten können und im Regelfall auch auftreten werden.

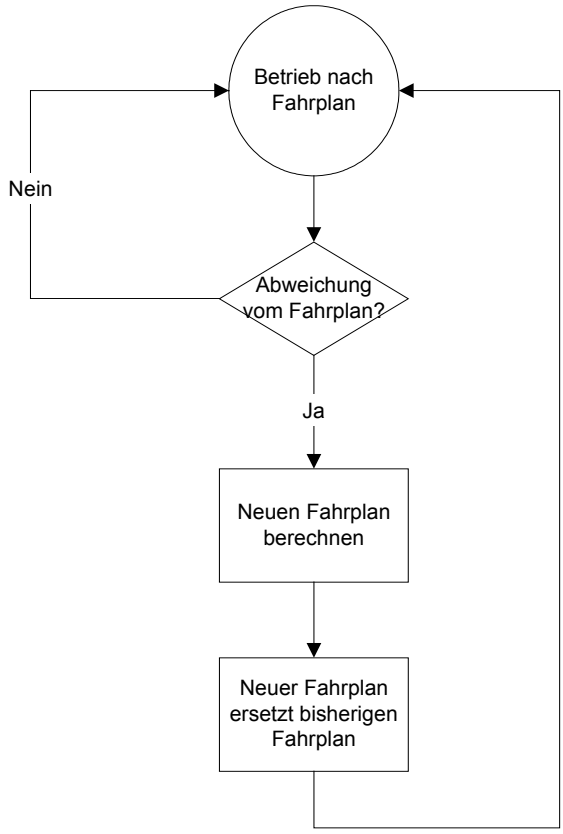

Abb. 15: Verfahren nach Patent von SCHWANHÄUßER

Nach [93] ist dieses Verfahren besonders vorteilhaft anwendbar bei Verkehrssystemen, die eine komplexe Netzstruktur haben und bei denen vorgesehen ist, daß bestimmte Fahrten Vorrang vor anderen Fahrten haben. Beispielsweise sind Eisenbahnen ein derartiges Verkehrssystem, jedoch kann das Verfahren ebenso im Schiffsverkehr oder Flugverkehr eingesetzt werden [93].

5.3 Grundlagen des neuen Dispositionsverfahrens

Zur Umsetzung dieses neuartigen Konzepts können die Erfahrungen genutzt werden, die bereits bei anderen eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren gewonnen wurden. So liegt es nahe, als Infrastrukturdatengrundlage den für die Fahrplankonstruktion mit FAKTUS/RUT-0 entwickelten SPURPLAN-Graphen zu verwenden, da in diesem Format alle wichtigen Strecken der DB Netz AG aufgenommen wurden, und die somit auch für die Disposition zur Verfügung stehen. Da dieser Graph schon alle fahrzeit- und sperrzeitrelevanten Merkmale enthält, ist hier auch keine Anpas-

sung notwendig. Weiterhin besteht mittels des SPURPLAN-Graphen auch die Möglichkeit, Netzteile abzubilden. Damit können beispielsweise ein größerer Knotenbahnhof und sämtliche in diesen Knoten hineinführenden Strecken bei der Disposition berücksichtigt werden.

Für qualitativ gute Dispositionsentscheidungen ist eine korrekte Abbildung der Zugfahrten zwingend erforderlich. Es müssen nicht nur die Zeit-Weg-Linien sondern auch die Sperrzeitentreppen der Züge betrachtet werden; dazu ist eine Fahrzeit- und Belegungsrechnung notwendig. Grundlage für diese Berechnung ist eine exakte Abbildung der Infrastruktur. Der für die Fahrplankonstruktion mit FAKTUS/RUT-0 bei der DB Netz AG eingeführte SPURPLAN-Graph enthält auch alle für die Disposition erforderlichen Infrastrukturdaten. Der SPURPLAN-Graph ist eine exakte und redundanzfreie Abbildung der Gleisinfrastruktur. Es können größere Netze mit umfangreichen Knotenbahnhöfen sowie ein- und zweigleisige Strecken aufgenommen werden.

5.3.1 Sperrzeitenbasierter Ansatz

In diesem Abschnitt sollen die Grundlagen eines sperrzeitbasierten Ansatzes kurz beschrieben werden. Aufgrund der Signal- und Sicherungstechnik ergeben sich Abhängigkeiten zwischen einzelnen Zugfahrten. Das in Deutschland verwendete „Fahren im Blockabstand“, welches aufgrund der hohen Belastung und langen Bremswege erforderlich ist, unterteilt eine Strecke in sogenannte Blockabschnitte. Durch die Signal- und Sicherungstechnik muß nun sichergestellt sein, daß sich in einem Blockabschnitt nur genau ein Zug befinden darf. Die Hauptsignale zu Beginn eines Abschnittes zeigen „Halt“ oder „Fahrt“, dementsprechend, ob der nachfolgende Blockabschnitt belegt oder frei ist. Wegen der langen Bremswege im Eisenbahnwesen müssen die Hauptsignale durch Vorsignale angekündigt werden, die im Bremswegabstand aufgestellt werden.

Um eine unbehinderte Fahrt eines Zuges zu gewährleisten, muß der jeweils nächste Blockabschnitt bereits frei sein, wenn der Zug sich noch vor dem betreffenden Vorsignal befindet. Ansonsten würde der Zug unweigerlich abgebremst werden müssen und so gestutzt werden. An diesem Grund setzt sich die Sperrzeit eines Blockabschnitts nicht nur aus der eigentlichen Fahrzeit des Zuges im Block und der Räumfahrzeit zum Verlassen des Blocks sondern zusätzlich aus der Annäherungsfahrzeit (vom Vorsignal bis zum Hauptsignal) zusammen. Weiterhin kommen noch die Sichtzeit, zum Erkennen des Vorsignalbegriffs, und Schaltzeiten (Fahrstraßenbildezeit und Fahrstraßenauflösezeit) hinzu (siehe Abb. 16).

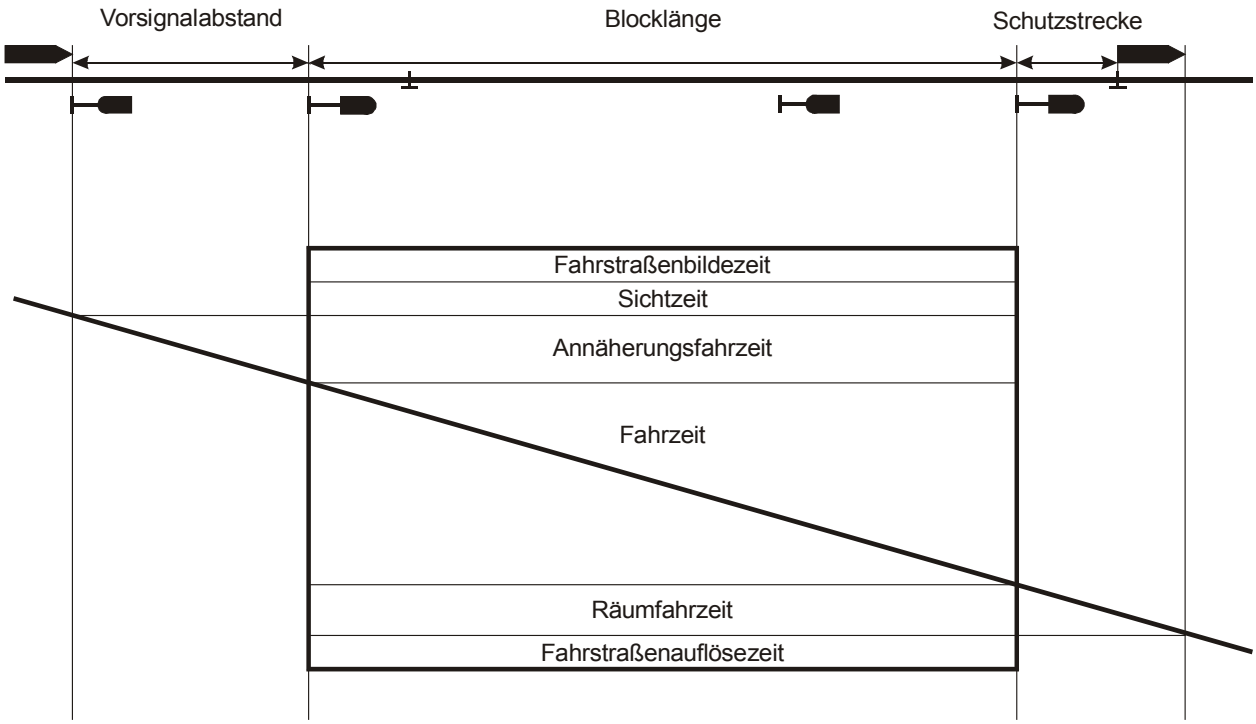

Abb. 16: Elemente der Sperrzeit

Die in dieser Form gebildete Sperrzeit eines Blockabschnitts kann nun mit den Sperrzeiten der übrigen Blockabschnitte zu der sogenannten Sperrzeitentreppe zusammengestellt werden.

In Bahnhöfen müssen die Blockabschnitte noch weiter unterteilt werden. Hier sind die Belegungszeiten für einzelne Weichen zu ermitteln, denn bei moderner Stellwerkstechnik können die Weichen einzeln aufgelöst werden, so daß die gröberen Blockabschnitte in Belegungselemente aufgeteilt werden. Die Belegungselemente sind dann ganze Blockabschnitte oder einzelne Weichen bzw. Zwischenweichenabschnitte. Durch diese feingliedrige Einteilung können auch in größeren Fahrstraßenknoten die Belegungen der Züge korrekt ermittelt und damit Konflikte zwischen den Zügen bestimmt werden.

Die sperrzeitenbasierten Ansätze haben sich für die eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Systeme zur analytischen Leistungsfähigkeitsberechnung und der Simulation schon seit Jahren bewährt. Durch Einführung des SPURPLAN-Graphen und FAKTUS/RUT-0 zur rechnerunterstützten Fahrplanfeinkonstruktion sind die sperrzeitenbasierten Verfahren auch ins Trassenmanagement eingeführt worden.

5.3.2 Der SPURPLAN-Graph

Der sogenannte SPURPLAN-Graph [12] ist ein gerichteter, knotenbewerteter Digraph. In den Knoten des Graphen sind die einzelnen Infrastrukturmerkmale gespeichert, auch wenn es sich um abschnittsweise geltende Informationen handelt. Denn neben den punktförmigen Merkmalen der Infrastruktur, wie beispielsweise Signalstandorte, existieren auch abschnittsförmige, wie Geschwindigkeiten und Neigungen. Bei den abschnittsförmigen Merkmalen wird jeweils die Änderung der Information wiedergegeben. Alle Merkmale, sowohl die punktförmigen als auch die Änderungen der abschnittsförmigen, werden als Knoten in den SPURPLAN-Graphen aufgenommen [15]. Jedes dieser Infrastrukturmerkmale (z. B. Hauptsignale, Vorsignale, Zugschlußstellen, Geschwindigkeitswechsel, Neigungswechsel, Halteplätze, …) erhält als Knotenattribut jeweils die Kilometrierung und beispielsweise Durchrutschwegauflösezeit, Fahrstraßenbildezeit, Fahrstraßenauflösezeit, neue Geschwindigkeit, neue Neigung, Haltplatzlänge usw. Im Gegensatz zu diesen Infrastrukturknoten werden Weichen nicht nur durch einen sondern durch drei Knoten, und eine Kreuzungsweiche durch vier Knoten abgebildet. Mittels dieser Modellierung, ein Knoten für jedes Weichenende, können die möglichen Fahrten auf den Weichen direkt festgelegt werden.

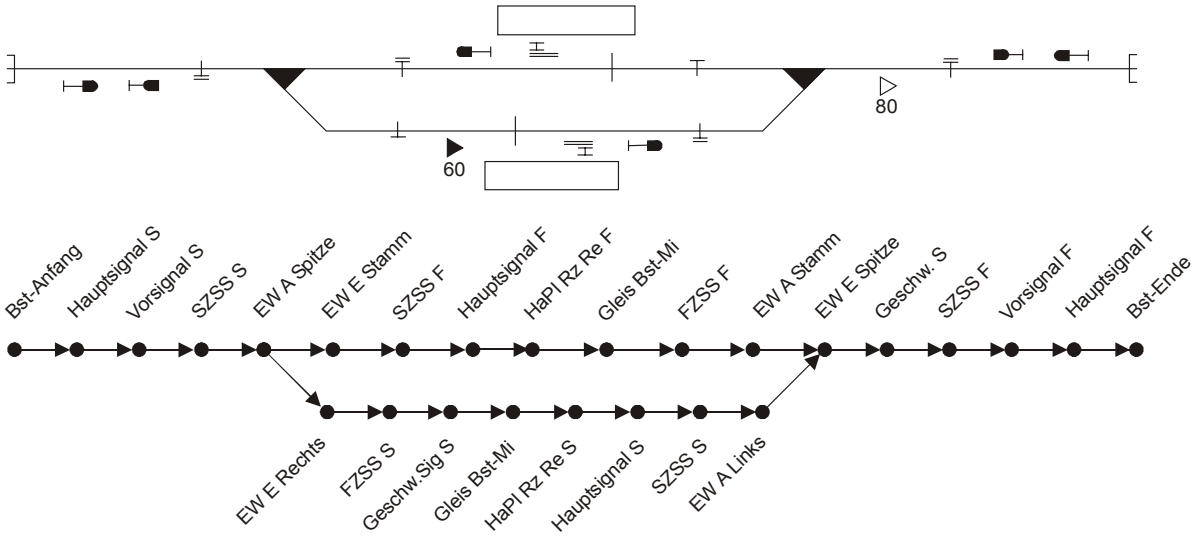

Abb. 17: Beispiel eines SPURPLAN-Graphen

Die gerichteten Kanten des Graphen dienen zur Abbildung der Gleistopologie und enthalten keine Attribute. In Abb. 17 ist ein Beispiel für einen Ausschnitt aus einem SPURPLAN-Graphen dargestellt. Die Infrastrukturelemente sind aufgrund ihrer Kilometrierungen nacheinander in den Graphen eingekettet. Die richtungsbezogenen Infrastrukturelemente (Signale, Halteplätze, …) erhalten als zusätzliche Kennzeich-

nung ein S oder F. Dies bedeutet, daß ein mit S bzw. F gekennzeichnetes Infrastrukturelement in steigender bzw. fallender Kilometrierungsrichtung gültig ist. Diese Kennzeichnung entfällt bei richtungsunabhängigen Infrastrukturelementen, z. B. Weichen und Betriebsstellenmitten.

Der SPURPLAN-Graph enthält keine Informationen über die vorhandenen Fahrwege. Die Fahrwege in den einzelnen Betriebsstellen werden als Folge von Knoten des SPURPLAN-Graphen zusätzlich definiert. Diese sogenannten Betriebsstellenfahrwege werden neben dem Anfangs- und Endknoten durch den zweiten Knoten jeder befahrenen Weiche exakt und redundanzarm definiert. Hierbei müssen beispielsweise beim Einfügen oder Löschen eines beliebigen SPURPLAN-Elements (außer Weichen) die Betriebsstellenfahrwege nicht aktualisiert und angepaßt werden.

Mit dieser Definition der Fahrwege können auch Fahrstraßenausschlüsse im Bahnhof aufgrund der Gleistopologie erkannt werden. Dies gilt auch für den Fall, daß zwei Fahrwege nur eine einzige gemeinsame Weiche enthalten. Bei der Aufnahme der Fahrwege können außerdem fahrwegspezifische Besonderheiten festgelegt werden.

Bei den Betriebsstellenfahrwegen wird unter anderem die Hierarchie des Fahrwegs definiert. Diese Hierarchiezahl kann von 100 (höchste Hierarchie, in der Regel Durchgehendes Hauptgleis), 80 (in Fahrtrichtung rechts liegendes Überholungsgleis), 60 (mittig liegendes Überholungsgleis), 40 (in Fahrtrichtung links liegendes Überholungsgleis) bis hinunter zu 0 (niedrigste Hierarchie, Fahrweg kann nicht verwendet werden) eingegeben werden. Hierarchiewerte können nach den Zugklassen getrennt vergeben werden. So ist es zum Beispiel möglich, Fahrwege, die ausschließlich dem Reisezugverkehr vorbehalten sind, mit einer Hierarchie von 0 für die Güterzugklassen zu belegen. Dann ist eine spätere Verwendung dieses Fahrwegs für Güterzüge unmöglich. Die Hierarchiewerte der Fahrwege sind für die interaktive Fahrplankonstruktion prinzipiell nicht notwendig und finden nur wenig Beachtung. Für eine automatische Konfliktlösung bei der Disposition ist es allerdings unerläßlich, daß die Fahrwege in einer sinnvollen Weise (nach ihrer Wichtigkeit) sortiert sind, um die automatische Fahrwegsuche zu unterstützen. Hierbei ist es auch von Bedeutung, daß diese Hierarchiewerte bei mehreren rechts liegenden Überholungsgleisen noch abgestuft werden (beispielsweise 81, 82, …), so daß hier auch eine Bewertung der rechts liegenden Überholungsgleise untereinander vorgenommen werden kann.

Die Laufwege der Züge von Start- bis Zielbahnhof setzen sich dann aus einer Folge von Betriebsstellenfahrwegen zusammen. Zur Bildung des sogenannten Standardlaufwegs werden die Fahrwege mit der höchsten Priorität verwendet, welche im Regelfall das durchgehende Hauptgleis benutzen.

5.3.3 FAKTUS/RUT-0

Aufbauend auf den SPURPLAN-Graphen als Infrastrukturdatenbasis ist das Verfahren FAKTUS/RUT-0 zur Fahrplanfeinkonstruktion entwickelt worden. Durch FAKTUS/RUT-0 wurde Ende der 90er Jahre die manuelle Fahrplankonstruktion bei der Deutschen Bahn abgelöst. Die Fahrpläne werden nun mittels Rechnerunterstützung von den Trassenmanagern konstruiert. Nachdem das Verfahren schon in Abschnitt 2.1.2 näher erläutert wurde, soll hier nur kurz zusammengefaßt werden, welche Teile aus FAKTUS/RUT-0 für die Disposition verwendet werden können. Für eine nähere Beschreibung siehe Abschnitt 2.1.2.

FAKTUS/RUT-0 besitzt eine integrierte Fahrzeitrechnung nach dem Δv-Schritt-Verfahren. Die hierzu benötigten Zugparameter (Tfz-Baureihe, Last, Länge, …) werden in Dialogen durch den Trassenmanager eingegeben. Zu den Tfz-Baureihen sind im Programm die z-v-Diagramme hinterlegt, so daß die Zugkraft exakt ermittelt werden kann. Neben der Fahrzeitrechnung ist auch eine Belegungsrechnung in FAKTUS/RUT-0 enthalten, mit deren Hilfe die Belegungszeiten der einzelnen Belegungselemente ermittelt werden können.

Die exakte Berechnung der Belegungszeiten ist für die Konflikterkennung unerläßlich. Die Konflikterkennung kann nun unmittelbar die Belegungszeiten nach Überschneidungen durchsuchen und somit alle auftretenden Konflikte ermitteln. Dies schließt auch die Konflikte ein, die aufgrund von Durchrutschwegbelegungen entstehen.

Diese aufgeführten Funktionalitäten, insbesondere die Fahrzeit- und Belegungszeitrechnung des Fahrplankonstruktionssystems FAKTUS/RUT-0 werden auch für die Disposition benötigt. Neben der Konflikterkennung ist jedoch für eine automatische Disposition noch eine Konfliktlösung erforderlich. Die Möglichkeiten der Konfliktlösung sind in FAKTUS/RUT-0 im wesentlichen schon enthalten, müssen jedoch einzeln vom Trassenmanager ausgewählt und manuell ausgeführt werden. Bei einem rechnerunterstützten Dispositionssystem werden die Konfliktlösungsmöglichkeiten selber ausgesucht und angestoßen.

5.4 Unterschiede zur Fahrplankonstruktion

Nachdem im vorherigen Abschnitt erläutert wurde, welche Grundlagen aus SPURPLAN bzw. FAKTUS/RUT-0 für die Disposition übernommen werden konnten, sollen nun die Unterschiede zwischen der Fahrplankonstruktion und der Disposition erläutert werden. Dies betrifft zum einen die Infrastruktur und zum anderen die Zugparameter.

5.4.1 Infrastruktureinschränkungen

Bei der Fahrplankonstruktion wird angenommen, daß sich die der Konstruktion zugrundeliegenden Daten während des gesamten Fahrplanjahres nicht ändern. Hierbei wird ein unveränderlicher Zustand der Infrastruktur (Gleistopologie, Signalausstattung, …) sowie außerdem die vollständige Verfügbarkeit der Infrastruktur angenommen und diese dann für das gesamte Jahr vorgegeben.

Bei der Disposition kann die Infrastruktur durch Störungen nur noch eingeschränkt zur Verfügung stehen. Hierbei können einzelne Elemente (Weiche, Signal, …) gestört sein, so daß bei einer Weichenstörung bestimmte Fahrstraßen nicht genutzt werden können. Bei einer Signalstörung oder einer Achszählerstörung muß ggf. mit Ersatzsignal oder evtl. sogar auf Sicht weitergefahren werden, was natürlich zum Teil erhebliche Fahrzeitverluste zur Folge hat. Es kann bei einem Schienenbruch sogar erforderlich sein, daß ein komplettes Gleis gesperrt werden muß, und dann von einer zweigleisigen Strecke nur noch ein Streckengleis zur Verfügung steht.

Des weiteren werden auch im aktuellen Fahrplanjahr Baustellen eingerichtet. Diese Baustellen gelten dann beispielsweise nur für einige Nachtstunden. Hier ist es erforderlich, einen Kalender für zeitweilige Langsamfahrstellen vorzuhalten. An den Infrastrukturelementen muß dann vermerkt werden, welchen Gültigkeitszeitraum sie haben. So wird für eine Langsamfahrstelle ein Geschwindigkeitswechsel in den Infrastrukturgraphen eingefügt, der über einen Anfangs- und einen Endzeitpunkt verfügt, ab wann bzw. bis wann diese Geschwindigkeitseinschränkung gilt.

Für die Disposition ist es wichtig, so schnell wie möglich alle auch ad hoc auftretenden Infrastruktureinschränkungen zu kennen. Denn nur mit diesem Wissen kann die Prognose der Fahrzeitrechnung hinreichend genau sein, so daß auch weiter entfernt liegende Konflikte korrekt erkannt werden können. Mit einer unzureichenden Prognose könnten Konflikte, die tatsächlich auftreten, nicht erkannt werden bzw. Konflikte prognostiziert werden, die in Wirklichkeit nicht vorhanden sind. Daher muß auf die Exaktheit der Prognose großer Wert gelegt werden.

5.4.2 Veränderung der Zugeigenschaften

Beim Trassenmanagement werden standardisierte Zugparameter für die zu konstruierenden Züge verwendet. Während diese für Reisezüge in der Regel noch weitestgehend mit den tatsächlichen Zugparametern übereinstimmen, trifft dies bei Güterzügen doch recht häufig nicht zu. Bei den Reisezügen ist die Abweichung seltener anzutreffen, da entweder Triebzüge oder aber feste Zugverbände (Wendezüge mit

Lok und Steuerwagen) eingesetzt werden, die nur im Störungsfall verändert werden. Die Parameter der Güterzüge, insbesondere Last und Länge der Züge, sind jedoch aufkommensabhängig und können tagtäglichen Schwankungen unterworfen sein. Daher wird beim Trassenmanagement in der Regel eine Maximallast und Maximallänge der Züge angenommen, mit denen dann die Trassen konstruiert werden.

Für eine qualitativ gute Prognose der Fahrzeit ist es hier notwendig, für jeden Verkehrstag die aktuellen Zugparameter zu kennen und in die Prognoserechnung einfließen zu lassen. Durch eine veränderte Last des Zuges ändert sich auch dessen Fahrdynamik, d. h. er kann beispielsweise schneller beschleunigen. Wenn der Zug kürzer ist als bei der Trassenkonstruktion, können gegebenenfalls auch andere, kürzere Überholungsgleise verwendet werden. Dadurch können im Verspätungsfall die Überholungen an Bahnhöfe verlegt werden, die bei der Standardlänge des Zuges nicht zur Verfügung stehen würden.

Im Störungsfall, beispielsweise bei Triebfahrzeugausfall, können sich die Zugparameter noch deutlicher ändern. So kann bei einem Ausfall eines ICE-Triebwagenzuges ein lokbespannter Ersatzzug zum Einsatz kommen, der über völlig andere fahrdynamische Werte verfügt. Dies kann sich in der Beschleunigung, aber auch in der Höchstgeschwindigkeit auswirken und darf bei einer qualitativ guten Prognose nicht unberücksichtigt bleiben.

Die DB Netz AG hat über diese veränderten Zugparameter jedoch keine Kenntnis, nur das jeweilige beteiligte EVU weiß, mit welchen Zugparametern der Zug aktuell verkehrt. Hier muß der Informationsfluß zwischen EVU und der DB Netz AG sichergestellt sein; nach Möglichkeit ist hier für die Zukunft ein Austausch der Daten auf elektronischem Wege anzustreben.

Des weiteren kann sich neben den Zugparametern auch die Priorität des Zuges je nach aktueller Verkehrslage ändern. Generell sollte die Priorität eines Zuges an den Trassenpreis gekoppelt sein, so daß sich EVU schon beim Trassenkauf eine bestimmte Betriebsqualität erkaufen können. Diese Priorität, die in der Betriebsabwicklung realisiert werden soll, kann sich auch je nach Betriebslage verändern. So könnte die Priorität eines verspäteten Zuges erhöht werden, so daß er die Verspätung wieder einfahren kann, oder aber herabgestuft werden, wenn ein Schwellenwert an Verspätungsminuten erreicht ist.

Diese Änderungen der Zugeigenschaften sollten bei einer Prognoserechnung berücksichtigt werden, so daß die Dispositionsentscheidungen auf einer stabilen

Grundlage beruhen. Denn an die Prognoserechnung sind die Konflikterkennung und -lösung gekoppelt, deren Qualität unmittelbar von der Qualität der Prognose abhängt.

5.5 Fahrplanmäßige und dispositive Daten

Für die Disposition sind neben der Berücksichtigung der zuvor vorgestellten Unterschiede zur Fahrplankonstruktion auch Erweiterungen von SPURPLAN und FAKTUS/RUT-0 erforderlich. Diese sollen in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt und erläutert werden.

Damit das Dispositionsverfahren einen Vergleich der aktuellen Zeit-Weg-Linie der Züge mit den geplanten Zeit-Weg-Linien durchführen kann, müssen die fahrplanmäßigen Abfahrts- und Haltezeiten aller Züge zusätzlich zu den aktuellen Zeiten gespeichert werden. FAKTUS/RUT-0 benötigt dies nicht, da bei der Fahrplankonstruktion immer nur der gerade aktuelle Stand gespeichert werden muß.

Aus diesem Grund ist es erforderlich, diese und weitere für die Disposition erforderliche Daten in einer separaten Datenstruktur zu speichern. Zusätzliche Daten werden für jeden Zug in jeder durchfahrenden Betriebsstelle verwendet. Zu diesen Daten zählen neben der fahrplanmäßigen Abfahrts- und Haltezeit auch die im Fahrplan enthaltenen Zuschläge.

Weiterhin werden eine dispositive Haltezeit und ein dispositiver Zuschlag benötigt. Diese werden bei der Konfliktlösung benutzt, um z. B. Haltezeitverlängerungen aufgrund einer Dispositionsentscheidung zu setzen und diese nicht mit den übrigen Daten zu vermischen, so daß gegebenenfalls diese Haltezeitverlängerung auch wieder rückgängig gemacht werden kann, falls sie nicht mehr erforderlich sein sollte. Analog gilt dies für den dispositiven Zuschlag, der sowohl einen zusätzlichen Fahrzeitzuschlag angeben als auch festlegen kann, daß trotz einer Verspätung des Zuges die im Fahrplan enthaltenen Zuschläge nicht gelöscht werden. Hierbei wird dann aus dispositiven Gründen im Verspätungsfall die Fahrzeit nicht wie sonst üblich gekürzt, sondern mit den im Fahrplan enthaltenen Zuschlägen weitergefahren.

5.6 Fahrzeitrechnung

Im Fahrplan sind Fahrzeitreserven enthalten, die im Verspätungsfall zum Abbau der Verspätung verwendet werden können. Als reine Fahrzeit bezeichnet man die aufgrund der Gegebenheiten kürzestmögliche Fahrzeit. Hierin gehen sowohl die Fahrzeugparameter (Tfz-Baureihe mit dem z-v-Diagramm, Last des Zuges, …) als auch die Infrastrukturmerkmale (Geschwindigkeitswechsel, Neigungswechsel, …) ein.

Hierbei handelt es sich also um die technische Fahrzeit, die nicht unterschritten werden kann.

5.6.1 Fahrzeitzuschläge

Um sowohl Umwelt- und Witterungseinflüsse als auch eine unterschiedliche Fahrweise der Triebfahrzeugführer zu berücksichtigen, wird auf die reine Fahrzeit der Regelzuschlag hinzuaddiert. Dieser wird prozentual auf die reine Fahrzeit gerechnet und variiert zwischen 3 % und 7 %, abhängig vom Triebfahrzeug (elektrische oder Diesellokomotive, Triebzug, …), von der Anhängelast und von der Streckengeschwindigkeit bzw. der Konstruktionsgeschwindigkeit des Zuges.

Zusätzlich zum Regelzuschlag kann der Fahrplanbearbeiter noch weitere Zuschläge für einzelne Züge hinzufügen. Dies kann z. B. für im Fahrplanjahr geplante Baustellen der Fall sein; auch vor größeren Knotenbahnhöfen werden häufig Fahrzeitzuschläge eingeplant. Der Bearbeiter gibt hierzu eine Fahrzeitverlängerung in Minuten zwischen zwei Betriebsstellen an.

Alle diese Fahrzeitzuschläge können im Betriebsablauf verwendet werden, um eine Verspätung zu minimieren oder im günstigsten Fall auch komplett wieder herauszufahren.

5.6.2 Haltezeiten

In den Betriebsstellen existieren mehrere Arten von Halten. Hier sind zum einen die Verkehrshalte zu nennen, die für verkehrliche Aufgaben notwendig sind. Hierunter zählen bei Reisezügen die Halte in den Bahnhöfen oder an Haltepunkten, wo Fahrgäste ein- oder aussteigen können, und bei Güterzügen die Halte, bei denen Wagen angehängt oder abgekuppelt werden. Zum anderen gibt es die Betriebshalte, die betrieblich notwendig sind, z. B. bei der Überholung eines Zuges. Bei Verkehrshalten wird unterschieden zwischen der Mindesthaltezeit, die aus verkehrlichen Gründen nicht unterschritten werden darf, und der fahrplanmäßigen Haltezeit, die sich aus der Mindesthaltezeit plus weiteren Zeitanteilen ergibt. Zu diesen weiteren Zeitanteilen kann z. B. die Zeit gehören, die für eine Überholung durch einen anderen Zug erforderlich ist.

Zusätzlich zur Haltezeit wird bei der Fahrplankonstruktion die Mindesthaltezeit vereinbart. Bei Betriebshalten ist diese Mindesthaltezeit gleich Null. Ansonsten muß die Haltezeit mindestens so groß sein wie die Mindesthaltezeit.

Im Betriebsablauf können die Haltezeiten auf die Mindesthaltezeiten verkürzt werden, wenn der Zug eine Verspätung besitzt. Auch die Betriebshalte können dann entfallen, wenn die geplante Überholung aufgrund der Verspätung in eine andere Betriebstelle gelegt wurde oder gegebenenfalls gar nicht mehr erforderlich ist.

Die Fahrzeit- und Haltezeitkürzungen müssen direkt bei der Fahrzeitrechnung berücksichtigt werden. Aus diesem Grunde sind in der Fahrzeit- und Belegungsrechnung einige Ergänzungen und Erweiterungen notwendig geworden. FAKTUS beginnt die Berechnung der Fahrzeit immer zum Zeitpunkt Null. Die hiermit errechneten Durchfahrtszeiten sowie die Belegungszeiten werden dann erst nach vollständiger Berechnung in die gewünschte zeitliche Lage verschoben. Für jeden Zug ist in irgendeiner Betriebsstelle seine Wunschlage definiert. Hierdurch kann nun die entsprechende Verschiebungszeit bestimmt werden, um die dann alle Durchfahrts- und Abfahrtszeiten sowie die Anfangs- und Endzeiten der Belegungselemente verändert werden müssen. Während der Berechnung der Fahrzeiten sind somit keine tatsächlichen Abfahrts- oder Durchfahrtszeiten vorhanden, ein Vergleich mit den planmäßigen Daten ist damit nicht möglich.

5.6.3 Sonderzuschläge

Ein weiteres Problem stellen die Sonderzuschläge dar, die auch erst nach Abschluß der Fahrzeitrechnung gemäß den Vorgaben des Bearbeiters zwischen den Betriebsstellen verteilt werden. Falls hierbei ein Zuschlag über mehrere Betriebsstellen aufgeteilt werden muß, wird der Zuschlag prozentual zur Fahrzeit zwischen den Betriebsstellen vergeben. Dadurch wird ebenfalls die Ermittlung der tatsächlichen Abfahrts- oder Durchfahrtszeiten erschwert.

5.6.4 Verhalten im Verspätungsfall

Da es jedoch bei der Disposition zwingend erforderlich ist, einen Vergleich der planmäßigen mit den aktuellen Daten schon während der Fahrzeitrechnung durchzuführen, mußte eine Möglichkeit geschaffen werden, den Vergleich der Ist-Daten mit den Plan-Daten zu realisieren. Hierzu wird bei der ersten Fahrzeitrechnung die Zeitdifferenz zwischen dem Laufweganfang des Zuges und der Durchfahrts- oder Abfahrtszeit in der ersten Betriebsstelle bestimmt und dann zusätzlich bei den fahrplanmäßigen und dispositiven Daten vermerkt (siehe auch Abschnitt 5.4). Diese Zeitdifferenz ist immer konstant und kann dazu verwendet werden, um die aktuelle zeitliche Lage zu bestimmen. Die prozentual verteilten Sonderzuschläge werden ebenfalls von der

ersten Fahrzeitrechnung verwendet und dann bei der Berechnung der aktuellen Abfahrts- oder Durchfahrtszeiten berücksichtigt.

Mit Hilfe dieser Erweiterungen der Fahrzeitrechnung kann nun in jeder Betriebsstelle festgestellt werden, ob der Zug planmäßig verkehrt oder eine Verspätung besitzt. Im planmäßigen Fall wird nichts weiter unternommen und die Fahrzeitrechnung wie bisher weitergeführt. Falls eine Verspätung auftritt, wird in die Fahrzeitrechnung eingegriffen. Dabei werden alle Fahrzeitzuschläge (auch der Regelzuschlag) zu Null gesetzt. Die Überprüfung, ob der Zug noch verspätet ist, wird in jeder Betriebsstelle vorgenommen, also nicht nur in den Betriebsstellen, in denen ein Verkehrshalt vorgesehen ist, sondern in allen Betriebsstellen mit Fahrzeitmeßpunkt, an denen die planmäßigen Durchfahrtszeiten vorhanden sind. Sobald ein Zug in einer Betriebsstelle keine Verspätung mehr aufweist, wird wieder mit den im Fahrplan vorhandenen Fahrzeitzuschlägen gerechnet.

Die Halte in den Betriebsstellen werden auf die Mindesthaltezeiten gekürzt, gegebenenfalls, wenn die Mindesthaltezeit gleich Null ist, wird der (Betriebs-)Halt des Zuges gelöscht, und der Zug fährt in dieser Betriebsstelle ohne Halt durch. Bei Reisezügen ist beim Kürzen der Haltezeit auf die Mindesthaltezeit darauf zu achten, daß der Zug nicht vor seiner planmäßigen Abfahrtszeit abfahren darf. Denn es kann auftreten, daß ein Zug bei seiner Ankunft noch verspätet ist, daher also seine Haltezeit auf die Mindesthaltezeit gekürzt wird, er durch diese Haltezeitverkürzung jedoch schon vor Plan abfahren würde. Dies darf bei Reisezügen natürlich nicht vorkommen, daher muß in diesen Fällen die Haltezeit wieder soweit verlängert werden, daß der Zug seine planmäßige Abfahrtszeit einhält und dann wieder in seiner Fahrplanlage weiterfährt.

Je nachdem, wie groß die Fahrzeitzuschläge und die Differenzen zwischen den Haltezeiten und den Mindesthaltezeiten sind, können die Züge eingetretene Verspätungen mehr oder weniger gut herausfahren. Wie gut der Verspätungsabbau der einzelnen Züge ist, hängt also von der jeweiligen Fahrplansituation ab. Insbesondere werden die Sprinter-ICE teilweise ohne oder nur mit halbem Regelzuschlag gerechnet, so daß für diese Züge die Fahrzeit möglichst gering wird. In FAKTUS sind speziell die Zuggattungen ICE-0 und ICE50 enthalten. Dadurch ist natürlich nur ein sehr geringer bzw. gar kein Verspätungsabbau mehr möglich. Wenn diese Züge einmal eine Verspätung haben, behalten sie diese auch bis zum Ende ihres Zuglaufs. Prinzipiell dürfte es eigentlich keinen Zug geben, der ohne Regelzuschlag verkehrt, denn schließlich dient der Regelzuschlag nicht nur dem Verspätungsabbau, sondern in ihm sind auch die unterschiedlichen Wetterverhältnisse, z. B. nasse Schienen mit einem geringeren Haftreibungsbeiwert, berücksichtigt.

6 Entwicklung der neuen Algorithmen

In diesem Kapitel werden die neuen Algorithmen für die asynchrone Disposition (ASDIS) beschrieben. Zunächst wird in Abschnitt 6.1 der neue, speziell für ASDIS entwickelte, asynchrone Einlegealgorithmus erläutert. Der Hauptteil dieses Kapitels besteht aus der Darstellung des Konfliktlösungsalgorithmus in Abschnitt 0. Die hier beschriebenen Algorithmen sind in Form einer Laborversion ASDIS/L implementiert worden. Nähere Details zur Implementierung finden sich im nächsten Kapitel.

Stark verwandt mit der Disposition ist die Simulation der Betriebsabwicklung (BABSI, [35]). Da am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen auch die Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung gleichzeitig zur Disposition entwickelt wurde, lag es nahe, die Synergien für beide Projekte zur nutzen. So wurde der Einlegealgorithmus für ASDIS entwickelt und in BABSI übernommen, und umgekehrt wurde der Fahrwegsuchalgorithmus für BABSI entwickelt und in ASDIS übernommen.

BABSI wird ebenso wie ASDIS in Form einer Laborversion BABSI/L entwickelt. In BABSI/L werden die zwei Stufen des Eisenbahnbetriebes, nämlich die Fahrplankonstruktion und der Betriebsablauf, simuliert. Bei der Simulation der Fahrplankonstruktion bilden die Trassenbestellungen der Eisenbahnverkehrsunternehmen die Ausgangslage für eine automatische Fahrplankonstruktion. Die Simulation des Betriebsablaufs bildet anschließend auf der Grundlage eines konfliktfreien Fahrplans die Betriebsabwicklung unter zufällig eingespielten Störungen ab. Nach Abschluß von mehreren Simulationsläufen können dann statistische Auswertungen über die Fahrplanqualität unter den Bedingungen eines gestörten Betriebsablaufs getroffen werden.

6.1 Der Einlegealgorithmus

Der Einlegealgorithmus entscheidet, in welcher Reihenfolge die einzelnen Züge berücksichtigt werden. Für das Einlegen der Züge ist sowohl eine asynchrone als auch eine synchrone Vorgehensweise möglich. Bevor der für ASDIS neu entwickelte Einlegealgorithmus vorgestellt wird, sollen nochmals kurz die synchronen (siehe auch Abschnitt 4.3) und die bisherigen asynchronen Verfahren (siehe auch Abschnitt 4.4) dargestellt werden.

6.1.1 Synchrone Algorithmen

Bei den synchronen Algorithmen, die in Simulationsmodellen wie z. B. in der SIMU-Familie Verwendung finden, werden die Züge gemäß einem Zeitschrittverfahren eingelegt. Dabei läuft eine interne Uhr, welche die Simulationszeit darstellt, und alle Züge werden schrittweise berücksichtigt, d. h. es wird berechnet, wie weit jeder einzelne Zug in dem Zeitschritt gekommen ist. Nachdem dies für alle Züge berechnet worden ist, kann die interne Uhr um eine Zeiteinheit vorgerückt werden. Diese Zeitschritte können entweder gleich groß sein oder aber in der Größe variieren; im letzteren Fall wird der Zeitschritt ereignisorientiert festgelegt. Konflikte entstehen dadurch, daß ein Zug einen Abschnitt belegen will, der von dem vorausfahrenden Zug noch nicht geräumt wurde. Hierdurch wird der zweite Zug gestutzt, gegebenenfalls muß er sogar vor dem haltzeigenden Signal anhalten. Dies ist ein unerwünschter Effekt und sollte durch eine vorausschauende Disposition im Eisenbahnbetrieb nicht auftreten.

Eine geeignete Berücksichtigung der Hierarchie der Zugfahrten ist eine Vorraussetzung für ein Simulations- oder Dispositionsverfahren. Bei den synchronen Verfahren wird dies häufig durch Vorbelegungen realisiert. Je nach Zugpriorität wird dem Zug eine entsprechende Vorausbelegung zugeordnet, damit werden ein Blockabschnitt oder mehrere Blockabschnitte im voraus für diese Zugfahrt reserviert. Hierbei erhalten höherrangige Züge eine längere Vorbelegung als niederrangige Züge. In den meisten Fällen können die Prioritäten der Züge hiermit berücksichtigt werden. Jedoch ist es kein einfaches Problem, die Länge der Vorausbelegung geeignet festzulegen. Falls die Vorbelegung zu klein bemessen wird, kann es passieren, daß ein ICE trotz seiner hohen Rangstufe durch einen niederrangigen Zug behindert wird. Trifft die Vorbelegung eines Blockabschnitts die Belegung eines niederrangigen Zuges, muß der niederrangige Zug das nächstgelegene Überholungsgleis benutzen, um den ICE überholen zu lassen. Dies kann im Einzelfall, wenn nur wenige Überholungsmöglichkeiten bestehen, jedoch bereits zu spät sein, so daß eine Behinderung (Stutzen) des ICE entsteht.

Die Vorausbelegung von Blockabschnitten führt dazu, daß real nicht existierende Belegungen von Weichen usw. erzeugt werden. Hierdurch werden beispielsweise auch kreuzende Zugfahrten verhindert, die alleine aufgrund der Vorbelegungen nicht möglich sind. Aus diesem Grund ist Länge der Vorausbelegung begrenzt, da ansonsten die Vorbelegungen den Betriebsablauf unverhältnismäßig stören würden.

Aus diesem Grund sind in den verbesserten synchronen Algorithmen auch Sperrzeitentreppen integriert. Hierbei werden in jedem Zeitschritt die Sperrzeiten der jeweils betroffenen Züge für die nächsten Zeitschritte berechnet. Durch diese Verwendung

der Sperrzeiten können oben angesprochene Behinderungen aufgrund der Vorausbelegung vermieden werden. Jedoch ist es hierbei auch nicht leicht, zu bestimmen, wie weit die Sperrzeiten im voraus berechnet werden müssen. Denn wenn die Sperrzeiten nicht weit genug gerechnet werden, kann die oben erwähnte Behinderung eines höherrangigen Zuges auch mit Verwendung von Sperrzeitentreppen auftreten.

6.1.2 Bisherige asynchrone Algorithmen

Im Gegensatz zu den synchronen Modellen werden die Züge bei den asynchronen Verfahren nicht in Zeitschritten eingelegt, sondern aufgrund der Priorität der einzelnen Züge. Während also bei synchronen Modellen der zu simulierende Zeitabschnitt genau einmal durchlaufen wird, erfolgt dies bei asynchronen Modellen mehrmals, für jede Hierarchieziffer einmal. Die Zugfahrten werden aufgrund ihrer Hierarchie sortiert und dann beginnt man mit den Zügen der höchsten Hierarchiestufe.

Beim asynchronen Verfahren STRESI werden die Züge einer Hierarchiestufe anhand ihrer Abfahrtszeit sortiert und dann gemäß dieser Reihenfolge vollständig von Laufweganfang bis Laufwegende in den Fahrplan eingelegt. Treten hierbei Konflikte auf, werden diese für den in Bearbeitung befindlichen Zug in zeitlicher Reihenfolge des Auftretens der Konflikte gelöst. So wird Zug für Zug einer Hierarchiestufe eingelegt, dann wird in die nächste Hierarchiestufe übergegangen. Ist auch die letzte Hierarchiestufe eingelegt worden, wurde der zu simulierende Zeitabschnitt mehrfach durchlaufen und so asynchron alle Konflikte gelöst.

Das Einlegen der Züge über den gesamten Laufweg ist jedoch bei eingleisigen Strecken nicht zielführend. Nach dem Einlegen der höherrangigen Züge kann es passieren, daß für niederrangige Züge keine freie Trasse mehr vorhanden ist. Aus diesem Grund ist der Einlegealgorithmus im asynchronen Verfahren NSIM für diesen Fall erweitert worden.

Analog zu STRESI werden die Züge asynchron, aber nicht mehr über den gesamten Laufweg eingelegt. An zuvor festgelegten Überholungs- oder Kreuzungsbahnhöfen wird nun das Einlegen unterbrochen. An diesen Brechpunkten wird jeweils überprüft, welcher Zug als nächstes an der Reihe ist, eingelegt zu werden. Maßgebend hierfür sind entweder die Abfahrtszeiten am Laufweganfang oder die Abfahrtszeiten in den Überholungs- bzw. Kreuzungsbahnhöfen.

Dieses Einlegeverfahren ist sowohl für zweigleisige als auch eingleisige Strecken, bis hin zu Teilnetzen anwendbar. Jedoch steigt mit der Netzgröße und der Anzahl der einzulegenden Züge auch der Verwaltungsaufwand, da bei den Zügen vermerkt wer-

den muß, bis wohin der Zug schon eingelegt worden ist. Außerdem muß die zeitliche Reihenfolge der Züge berücksichtigt werden, damit bestimmt werden kann, wann welcher Zug wieder an der Reihe ist, weiter eingelegt zu werden.

6.1.3 Neuer asynchroner Algorithmus für ASDIS

Der Vergleich von synchronen und asynchronen Einlegealgorithmen zeigt, daß für eine vorrausschauende Behandlung der auftretenden Konflikte in einem Netz, in dem die unterschiedlichsten Zugarten verkehren, asynchrone Algorithmen besser geeignet sind. Allerdings haben die bisher entwickelten asynchronen Einlegealgorithmen noch einen Erweiterungs- und Verfeinerungsbedarf. So sollen bei dem für ASDIS neu entwickelten asynchronen Einlegealgorithmus die Nachteile der bisherigen Einlegeverfahren vermieden werden. ASDIS soll nicht nur einzelne Strecken sondern auch Netzteile bearbeiten können. Daher scheidet der in STRESI verwendete Algorithmus von vornherein aus. Auch sollte nach Möglichkeit der Verwaltungsaufwand beim Einlegen der Züge gering sein, denn die Disposition in der Betriebszentrale ist eine Echtzeitanwendung. Aus diesem Grunde wurde der aus den asynchronen Verfahren bekannte Einlegealgorithmus modifiziert.

Nach wie vor werden die Züge unter Beachtung ihrer Hierarchie in den Fahrplan eingelegt, d. h. man beginnt mit den Zügen der höchsten Hierarchiestufe, fährt dann fort mit der nächsten usw., bis man bei der niedrigsten Stufe angekommen ist. Im Gegensatz zu den bisher verwendeten Verfahren wird nicht ein Zug eingelegt und dann dessen Konflikte gelöst, sondern es werden immer alle Züge einer Hierarchiestufe zunächst ohne Lösung der Konflikte eingelegt. Es ergibt sich ein Fahrplan mit Konflikten der Züge der aktuellen Hierarchiestufe untereinander sowie mit Zügen der höheren, schon eingelegten Hierarchiestufen. Die auftretenden Konflikte werden nun gemäß ihrer zeitlichen Abfolge gelöst. Die aus einer Konfliktlösung resultierenden weiteren Folgekonflikte werden entsprechend ihrer zeitlichen Reihenfolge mit den übrigen schon vorhandenen Konflikte berücksichtigt. Nach Lösung des zeitlich letzten Konflikts liegt ein konfliktfreier Fahrplan vor, der die aktuelle und alle höheren Hierarchiestufen umfaßt. Nun wird das Verfahren mit der nachfolgenden Hierarchiestufe fortgesetzt.

Durch dieses speziell für ASDIS neu entwickelte asynchrone Verfahren zum Einlegen der Züge in den Fahrplan muß keine explizite Reihenfolge der einzulegenden Züge innerhalb einer Rangordnungsstufe festgelegt werden. Diese Entscheidung, welcher Zug als nächster an der Reihe ist, um weiter eingelegt zu werden, muß bei NSIM anhand von Sortierquerschnitten getroffen werden. Daher ist das neue Verfah-

ren universell in Netzteilen einsetzbar, ohne vorher solche Sortierquerschnitte zu definieren.

6.2 Fahrwegsuchalgorithmus

Eine automatische Fahrwegsuche ist für die Bestimmung alternativer Fahrwege zur Lösung von Konflikten unumgänglich. Der Algorithmus muß mit Hilfe der im SPURPLAN-Graphen verwendeten Fahrwege Alternativen zum bisherigen Laufweg des Zuges bestimmen können.

6.2.1 Abbildung der Fahrwege in SPURPLAN

Die Infrastruktur wird mittels des SPURPLAN-Graphen modelliert. Der SPURPLAN-Graph beinhaltet alle erforderlichen Infrastrukturdaten sowie zusätzliche Angaben über Fahrwege, die in FAKTUS für die Zugfahrten zur Verfügung stehen. Die Infrastruktur ist abgegrenzt durch die sogenannten Betriebsstellengrenzen, die die Infrastruktur in einzelne Betriebsstellen aufteilen. Die Fahrwege werden in den jeweiligen Betriebstellen definiert, dabei beginnt ein Fahrweg entweder an der Betriebsstellengrenze oder einem Halteplatz und endet ebenfalls an einer Betriebsstellengrenze oder einem Halteplatz. Im Regelfall sind die Fahrwege von Betriebsstellengrenze zu Betriebsstellengrenze vereinbart, nur bei beginnenden und endenden Zügen ist die Möglichkeit gegeben, Fahrwege ab oder bis zu einem Halteplatz zu definieren. Der gesamte Laufweg des Zuges in FAKTUS setzt sich dann aus den einzelnen Fahrwegen in allen durchfahrenen Betriebsstellen des Zuges zusammen. In der ursprünglichen Modellierung sollten die Betriebsstellengrenzen an den Trennstellen zwischen Bahnhof und Strecke eingerichtet werden, so daß bei einer Fahrwegwahl in einem Bahnhof nur ein Fahrweg in einer Betriebsstelle zu ändern gewesen wäre. Leider entsprach dies nicht immer der bisherigen Abgrenzung der Betriebsstellen innerhalb der Deutschen Bahn. So existieren Bahnhöfe, die aus einem Personenbahnhofsteil und einen Güterbahnhofsteil zusammengesetzt sind, wobei die beiden Teile unterschiedliche Betriebsstellen darstellen und teilweise die Trennung zwischen den Betriebsstellen mitten innerhalb der Personenbahnhofsgleise angeordnet ist. Daher ist es nur im günstigsten Fall bereits ausreichend, in einer Betriebsstelle einen anderen Fahrweg zu verwenden, damit z. B. ein Konflikt nicht mehr auftritt. Im Regelfall ist es jedoch erforderlich, Fahrwege über mehrere Betriebsstellen hinweg zu ändern. Hierzu ist ein komplexer Fahrwegsuchalgorithmus notwendig, der unter gegebenen Restriktionen alle möglichen Fahrwegkombinationen ermittelt. Hierbei treten als Restriktionen beispielsweise auf, daß bei einem Verkehrshalt eines Zuges auch in den Fahrwegalternativen ein entsprechender Halt zur Verfügung stehen muß, dessen

Halteplatznutzlänge ausreichend ist. Ferner dürfen bei einem Zug, der mit einem Elektrotriebfahrzeug bespannt ist, ausschließlich Fahrwege verwendet werden, die über einen Fahrdraht verfügen. Nur mit einem komplexen Fahrwegsuchalgorithmus ist es überhaupt möglich, auch großräumige Umfahrungen eines Konflikts zu ermöglichen.

6.2.2 Ermittlung alternativer Laufwege

Der Laufweg eines Zuges kann durch andere Fahrwege in bisher verwendeten Betriebsstellen geändert werden. Es ist aber auch möglich, die Reihung der befahrenen Betriebsstellen zu ändern, solange weiterhin alle planmäßigen Halte in der korrekten Reihenfolge erreichbar sind. Dies ist beispielsweise dann notwendig, wenn neben einer zweigleisigen Strecke eine weitere, ein- oder zweigleisige Strecke parallel verläuft. Diese zweite Strecke hat eine eigene Streckennummer, und ggf. sind bei beiden Strecken auch unterschiedliche Betriebsstellen vorhanden. Für eine Konfliktlösung können oft alle Gleise gleichberechtigt verwendet werden, was allerdings eine Änderung der Betriebsstellenreihung nach sich zieht.

In ASDIS muß daher ein Verfahren vorhanden sein, das bei der Fahrwegwahl auch die Betriebsstellenreihung ändern kann. In FAKTUS hat ein Zug eine feste Betriebsstellenreihung, die manuell eingegeben wird; eine automatische Berechnung von Alternativrouten ist nicht möglich, allerdings ist diese für die manuelle Fahrplanerstellung auch nicht so wesentlich wie für ein Dispositionsverfahren. Daher wurde für ASDIS ein neues Konzept entwickelt, das aufbauend auf den Fahrwegen der einzelnen Betriebsstellen und ihren möglichen Verknüpfungen ein Fahrnetz erzeugt. Mit Hilfe dieses Fahrnetzes können dann in konkreten Konfliktfällen zwischen den von den Kunden bestellten Verkehrshalten alle möglichen Wege durch das Netz gefunden werden, auch solche, die eine andere Betriebsstellenreihung haben. Allerdings müssen bei der Verwendung solcher neuen Fahralternativen auch neu auftretende Konflikte und gegebenenfalls längere Fahrzeiten berücksichtigt werden. Zur Umsetzung dieser Aufgabenstellung sind größere Erweiterungen in ASDIS gegenüber FAKTUS notwendig. In [35] wird der verwendete Fahrwegsuchalgorithmus näher erläutert.

6.3 Verwendung von Mindestzugfolgezeiten

In diesem Abschnitt soll erläutert werden, wie die aus analytischen Verfahren bekannten Mindestzugfolgezeiten verwendet werden können, um Dispositionsentschei-

dungen zu beeinflussen. Für eingleisige Strecken wurden erste Ansätze zur Verwendung der Mindestzugfolgezeiten in [87] erarbeitet.

Der Konfliktlösungsalgorithmus muß bei einem Konflikt zwischen zwei Zügen effizient bestimmen können, um welche Zeit ein Zug verschoben werden muß, damit der Konflikt nicht mehr vorhanden ist. Dieses ist beispielsweise notwendig, um im Konfliktfall eine Haltezeitverlängerung zu berechnen. Dazu muß die Verschiebungszeit anhand der Belegungselemente der beteiligten Zugfahrten ermittelt werden. Dieses wird jedoch bei der interaktiven Fahrplankonstruktion mit FAKTUS/RUT-0 nicht benötigt. Daher werden die Belegungselemente auch nur in eine Richtung (zugweise) verkettet.

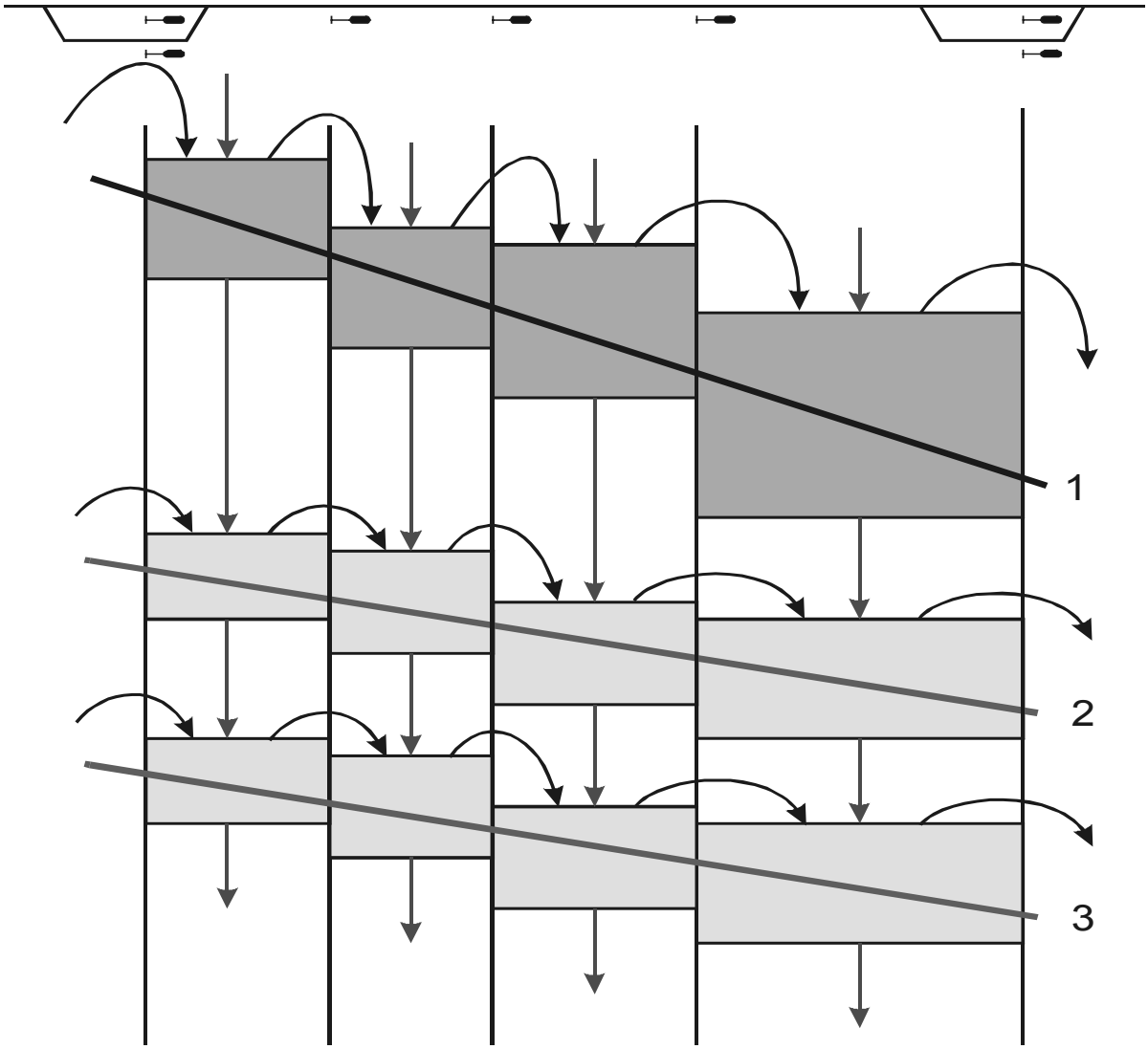

Abb. 18: Belegungsmatrix

Für diese in Abb. 18 dargestellte horizontale Verkettung werden die Belegungselemente unmittelbar in der Reihenfolge ihrer Berechnung in die Datenstruktur einge-

gliedert. Zur Ermittlung freier Zeitlücken zwischen den eingelegten Sperrzeitentreppen müssen die Belegungselemente aller Zugfahrten durchlaufen werden, denn hierzu sind die zeitlich gesehen vorherigen oder nachfolgenden Belegungen zu ermitteln. Dieses sehr zeitaufwendige Verfahren läßt sich nur durch eine zweite Verkettung (belegungselementweise) vereinfachen. Hierbei würde dann eine zusätzliche vertikale Verkettung (siehe Abb. 18) die einzelnen Belegungen der Belegungselemente in ihrer zeitlichen Reihenfolge durchlaufen.

Diese zusätzliche Verkettung muß bei jeder Änderung der Belegungen aktualisiert werden. Bei einer Fahrwegänderung in einer Betriebsstelle müssen die Belegungselemente des Zuges des vorherigen Fahrweges zunächst gelöscht und die Verkettung aktualisiert werden sowie anschließend die Belegungselemente des neuen Fahrwegs wieder in die zeitliche Reihenfolge einsortiert werden. Diese doppelte Verkettung muß bei jeder Neuberechnung der Fahrzeit sowie jeder Fahrwegänderung ständig auf den neuesten Stand gebracht werden. Da dies im Rahmen von Konfliktlösungsvarianten sehr häufig aktualisiert werden muß, wurde versucht, diesen zusätzlichen Aufwand für die Echtzeit-Disposition zu umgehen.

Alternativ läßt sich die Verschiebungszeit auch mit Hilfe von Mindestzugfolgezeiten ermitteln. In den analytischen Verfahren zur Berechnung der Leistungsfähigkeit werden Mindestzugfolgezeiten seit vielen Jahren genutzt. Neben den Standardverfahren der Programmfamilie SLS [95] finden sie auch Anwendung in ANKE [100], dem neuen Verfahren zur Analytischen Berechnung der Netzkapazität.

Zunächst eine Definition der Mindestzugfolgezeit (aus [104]):

> Die Mindestzugfolgezeit z_{ij} entspricht der Zeit, nach der ein Zug j einem Zug i folgen kann, ohne daß der Zug j eine Behinderung erfährt (stutzen muß). Die Mindestzugfolgezeit kann graphisch ermittelt werden, indem die Sperrzeitentreppen der beiden Züge so zusammengeschoben werden, daß sie sich mindestens an einer Stelle gerade berühren, aber nicht überschneiden.

Die Mindestzugfolgezeit bezieht sich immer auf einen Zugfolgefall und läßt sich aufgrund der Sperrzeitentreppen beider Züge relativ einfach berechnen. Wie die Mindestzugfolgezeiten ermittelt und zur Konfliktlösung in ASDIS in Kombination mit den Sperrzeitentreppen verwendet werden, wird in Abschnitt 6.5.4 und 6.5.5 detailliert erläutert. Die bei den analytischen Verfahren verwendeten Mindestzugfolgezeiten weichen in bestimmten Fällen von den hier benutzten Mindestzugfolgezeiten ab; diese Unterschiede sind ebenfalls in Abschnitt 6.5.4 beschrieben.

Ein weiterer Vorteil der Mindestzugfolgezeiten ist die Möglichkeit, daß sie in einem Preprocessing-Schritt zuvor berechnet werden können. In vielen Fällen kann die Dispositionsentscheidung aufgrund dieser Werte getroffen werden, so daß bei der Disposition die Zeiten unmittelbar zur Verfügung stehen und nicht noch berechnet werden müssen. In diesem Preprocessing-Schritt können die Mindestzugfolgezeiten für viele Standardfälle vorher ermittelt werden, jedoch muß unter bestimmten Voraussetzungen die Berechnung auch unmittelbar bei der Konfliktlösung angestoßen werden. Dies ist beispielsweise dann erforderlich, wenn die Züge aufgrund ihrer Verspätung die kürzeste Fahrzeit anstreben und sich durch diese Fahrzeitkürzungen Änderungen in den Mindestzugfolgezeiten ergeben. Allerdings können etliche Berechnungen bereits unmittelbar nach Erstellung des Jahresfahrplans durchgeführt werden und müssen nicht bei der zeitkritischen Disposition erfolgen. So kann gegebenenfalls die Zeit, die für Dispositionsentscheidungen zur Verfügung steht, anderweitig genutzt werden.

6.4 Partieller Vorrang

Bei den asynchronen Verfahren werden die Züge gemäß ihren Prioritäten in den Fahrplan eingelegt. Die Züge, die mit ihren Sperrezeitentreppen schon eingelegt wurden, werden im weiteren Verlauf nicht mehr verändert. Dies bewirkt, daß die höherrangigen Züge niemals durch niederrangige Züge aus ihrer Lage verdrängt werden und somit auch keine Folgeverspätungen aufgrund der später eingelegten Züge erhalten können. Der Vorteil dieser asynchronen Verfahren ist die exakte Berücksichtigung der Wertigkeit der Züge anhand von Prioritäten. Ein Nachteil ist, daß höherrangige Züge auch dann nicht verschoben werden, wenn dies bei den nachrangigen Zügen zu großen Folgeverspätungen führen würde.

Für die Lösung eines Konflikts zwischen zwei Zügen mit unterschiedlicher Rangordnung können beispielsweise die zwei folgenden Möglichkeiten bestehen. Bei der ersten wird der höherrangige Zug nicht verschoben, und der niederrangige erleidet eine Haltezeitverlängerung von 20 Minuten; bei der zweiten Möglichkeit wird der höherrangige Zug um eine Minute verschoben, und der niederrangige Zug erhält keine Verspätung. In diesem Fall, der insbesondere bei eingleisigen Strecken nicht selten auftritt, würde bei voller Beachtung der Priorität immer die erste Lösungsvariante gewählt werden. Im Regelfall ist dies jedoch nicht erwünscht, da bei einer Bevorzugung des niederrangigen Zuges der höherrangige Zug die relativ kleine Verspätung wieder einfahren kann, während der niederrangige Zug bei einer Bevorzugung des höherrangigen Zuges seine Verspätung nicht aufholen kann und dann gegebenenfalls noch weitere Konflikte mit anderen Zügen verursacht.

Der partielle Vorrang gewährt also in diesem Fall einem niederrangigen Zug Vorrang gegenüber einem höherrangigen. Folglich müssen Vorgaben existieren, wann der partielle Vorrang angewendet wird und wann nicht. Während im obigen Beispiel die Entscheidung sicherlich eindeutig ausfallen wird, müssen Grenzwerte definiert werden, die den partiellen Vorrang steuern. Beispielsweise kann der Disponent vorgeben, um wieviel Minuten ein höherrangiger Zug in solchen Fällen maximal verschoben werden darf. Alternativ ist denkbar, ein Verhältnis anzugeben, bis zu dem der partielle Vorrang angewendet wird. Bei einem Verhältnis von zum Beispiel 1:5 würde ein höherrangiger Zug um 2 Minuten verschoben, wenn alternativ der niederrangige Zug um 10 Minuten verschoben werden müßte. Dieses Verhältnis könnte jeweils aufgrund der Wertigkeit der beteiligten Zugfahrten bestimmt werden.

Damit diese Angaben, gegebenenfalls nach unterschiedlichen Rangstufen differenziert, korrekt definiert werden können, muß eine Bewertung der einzelnen Verspätungsminuten vorgenommen werden. Hierzu ist für die einzelnen Zuggattungen zu ermitteln, wie eine Verspätungsminute gewichtet werden muß. Daß eine Minute Verspätung eines ICE sicherlich höher zu bewerten ist als die eines Üg, ist offensichtlich, eine exakte Abgrenzung zu treffen, jedoch nicht trivial. Letztlich müßte das Ziel einer marktgerechten Bewertung der Verspätungen aufgrund der Erlöse erreicht werden. JOCHIM hat hierzu in [49] erste Ansätze entwickelt.

6.5 Konfliktlösungsalgorithmus

Für die Disposition mußte ein komplett neuer Konfliktlösungsalgorithmus entwickelt werden. Hierbei sollte eine umfassende Konfliktlösung erreicht werden, wobei nicht nur die einzelnen Lösungsmöglichkeiten getrennt voneinander ausprobiert werden, sondern auch Kombinationen von einzelnen Lösungsmöglichkeiten getestet werden.

Bei den Lösungsmöglichkeiten wird erstmals bei asynchronen Verfahren ein Fahrwegsuchalgorithmus verwendet, der alternative Fahrwege automatisch bestimmt. In dem asynchronen Simulationsverfahren STRESI, welches nur zur Simulation zweigleisiger Strecken konzipiert ist, liegen die Laufwege der Züge bis auf die verwendeten Bahnhofsgleise fest. Bei NSIM müssen Laufwegalternativen, die anstelle des Standardlaufwegs benutzt werden können, manuell vorgegeben werden. Dies ist natürlich in einem größeren Netzteil mit vielen Zugfahrten sehr aufwendig.

Die Zugfahrten werden vor dem Einlegen in den Fahrplan anhand ihrer Priorität sortiert und dann mit dem in Abschnitt 6.1.3 dargestellten Algorithmus eingelegt. Die Lösung der auftretenden Konflikte geschieht sukzessive in zeitlicher Reihenfolge der Konflikte. Um auch Netzteile, insbesondere eingleisige Strecken, simulieren zu kön-

nen, werden bei NSIM die Zugfahrten abschnittsweise eingelegt. Bei dem neuen Konfliktlösungsalgorithmus werden die Überholungsabschnitte je nach den beteiligten Zugfahrten und dem betreffenden Konfliktort bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung, wie diese Überholungsabschnitte bestimmt werden, ist in Abschnitt 6.5.2 zu finden.

Die Konfliktlösung soll eventuell notwendige Wartezeiten möglichst im zurückliegenden Bahnhof abwarten, und sie nicht auf die Strecke verlegen, indem der Zug langsamer fährt. Eine Verlagerung der Wartezeit auf die Strecke führt zu einer Erhöhung der Belegungszeiten und einer Senkung der Trassenkapazität der Strecke. Natürlich läßt sich dies insbesondere bei kurzfristigen Störungen nicht immer vermeiden. Tritt beispielsweise eine Störung erst ein, wenn der Zug bereits in dem zurückliegenden Bahnhof abgefahren ist, so kann man ihn nicht mehr zurückhalten und muß die dann notwendige langsamere Fahrt auf der Strecke hinnehmen.

6.5.1 Lösungsmöglichkeiten

Zur Konfliktlösung hat ein automatischer Konfliktlösungsalgorithmus, der bei der Disposition eingesetzt werden kann, die gleichen Lösungsmöglichkeiten, die auch bei der manuellen Fahrplankonstruktion dem Bearbeiter zur Verfügung stehen.

Die Lösungsmöglichkeiten sind schon im Abschnitt 2.3.4 erläutert worden und sollen hier nur noch einmal kurz dargestellt werden:

- Nutzung von Fahrwegalternativen
- Verlängerung eines planmäßigen Haltes
- Verlegung von Überholungshalten
- Einführung von zusätzlichen Betriebshalten
- Fahrzeitverlängerung

Im Regelfall reicht jedoch eine der obigen Möglichkeiten allein nicht aus, sondern es ist eine Kombination von mehreren Alternativen nach bestimmten Kriterien zu wählen.

6.5.2 Bestimmung des Überholungsabschnitts

Zur Lösung eines Konflikts muß zunächst der zugehörige Überholungsabschnitt bestimmt werden. Die grundsätzliche Philosophie von ASDIS besteht darin, daß die

Züge nicht auf der Strecke warten sondern in den zurückliegenden Bahnhöfen. Daher wird zunächst versucht, die Haltezeit im zurückliegenden Bahnhof zu verlängern, insbesondere wird die Wartezeit nicht durch langsameres Fahren auf der Strecke „abgebummelt“. Diese langsamere Fahrweise ist den im Zug sitzenden Kunden auch nur schlecht zu vermitteln. Das asynchrone Einlegeverfahren stellt sicher, daß im Regelfall diese Konfliktlösung nicht zur Anwendung kommt.

Die Fahrzeit- und Belegungsrechnung verwendet zur Ermittlung von Konflikten Belegungselemente. Diese sind z. B. Signalbelegung, Halteplatzbelegung, Weichenbelegung und andere. Aufgrund der Belegungsrechnung werden diese Belegungselemente für jeden Zug bestimmt und die Anfangs- und Endzeit der Belegung berechnet. Die Konflikterkennung überprüft dann, ob ein Belegungselement zur gleichen Zeit von mehr als einem Zug belegt wird. Genau dann liegt ein Konflikt vor und wird z. B. in FAKTUS durch eine rote Markierung dargestellt.

Zur Bestimmung des Überholungsabschnitts wird, ausgehend von dem Belegungselement, in dem der Konflikt auftritt, über die Belegungselemente des Zuges rückwärts und vorwärts gelesen (siehe Abb. 19). Falls in mehreren Belegungselementen eine Überschneidung auftritt, wird das zeitlich gesehen erste Belegungselement gewählt. Dann wird jeweils soweit gelesen, bis ein Halt des Zuges erreicht wird. Nun wird überprüft, ob an diesem Halt in der Betriebsstelle eine Überholungsmöglichkeit für den Zug besteht. Falls dies – beispielsweise an einem Haltepunkt – nicht der Fall ist, wird über diesen Halt weiter bis zum vorherigen bzw. nachfolgenden gelesen.

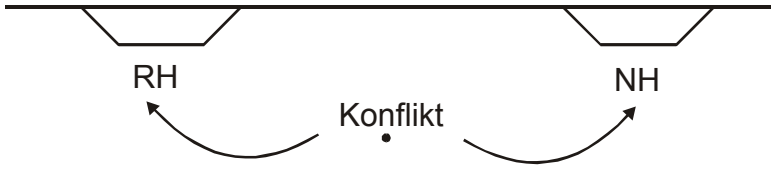

Abb. 19: Überholungsabschnitt

Am Ende dieses Durchlaufs hat man den vorherigen und nachfolgenden Halt der beiden Züge gefunden. Im folgenden wird der vorherige Halt des Zuges 1 mit RH1, der nachfolgende Halt des Zuges 1 mit NH1 bzw. RH2 und NH2 entsprechend für Zug 2 bezeichnet.

Im günstigsten Fall gilt RH1 = RH2 und NH1 = NH2, wenn beide Züge in die gleiche Richtung fahren oder RH1 = NH2 und NH1 = RH2, wenn beide Züge in unterschiedlicher Richtung verkehren. Dadurch ist der Überholungsabschnitt eindeutig bestimmt und liegt zwischen den Betriebsstellen RH1 und NH1. In Abb. 20 ist dies für Züge un-

terschiedlicher Richtungen dargestellt; fahren beide Züge in die gleiche Richtung, gilt obiges entsprechend.

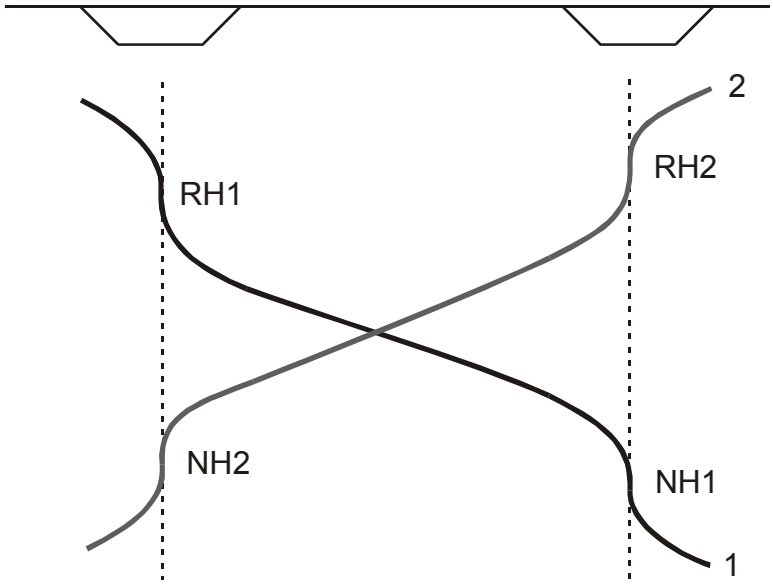

Abb. 20: Überholungsabschnitt bei gleichen Haltebahnhöfen

Im folgenden wird immer nur jeweils ein Fall (gleiche Richtung oder unterschiedliche Richtung) näher ausgeführt, der andere Fall gilt analog. Ebenso sind nur die Zeit-Weg-Linien der Züge abgebildet, auf die Darstellung der Sperrzeitentreppen wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

In allen anderen Fällen muß der Überholungsabschnitt noch näher bestimmt werden, in Abb. 21 dargestellt für zwei Züge gleicher Richtung. Hier muß die dem Konfliktelement jeweils nächste Betriebsstelle ermittelt werden. Die rückwärtige Betriebsstelle ist in diesem Beispiel RH1, und die nachfolgende ist NH2. Der maßgebende Überholungsabschnitt liegt also in diesem Fall zwischen den Betriebsstellen RH1 und NH2.

Die Mindestzugfolgezeiten werden dann für diesen Abschnitt bestimmt. Um den Konflikt zu lösen, muß die Haltezeit in der letzten Haltbetriebsstelle verlängert werden. Dies ist für Zug 1 die Betriebsstelle RH1 am Anfang des Überholungsabschnitts, für Zug 2 allerdings RH2, welche schon vor dem Überholungsabschnitt liegt. Im letzteren Fall kann bei einer bisherigen planmäßigen Fahrt des Zuges 2 der Fall eintreten, daß durch die Haltezeitverlängerung der Zug verspätet wird. Dann muß darauf geachtet werden, daß dieser Zug bis zur Betriebsstelle RH1 (bei kreuzenden Zugfahrten) bzw. Betriebsstelle NH1 (bei sich folgenden Zügen) keine kürzeste Fahrzeit anstrebt, d. h. er sollte wie im nichtverspäteten Fall mit seinen fahrplanmäßigen Zuschlägen fahren,

denn durch eine Fahrzeitkürzung könnte wieder ein neuer Konflikt entstehen, der dann eine längere Haltezeit notwendig machen würde. Da es natürlich keinen Sinn macht, einen Zug länger im Bahnhof warten zu lassen und dann auf der Strecke seine kürzestmögliche Fahrzeit zu erzielen, sollte hierbei auf das Kürzen der Fahrzeit verzichtet werden. Auch dieses wird in den dispositiven Daten vermerkt und dann bei der Fahrzeitrechnung entsprechend angewendet.

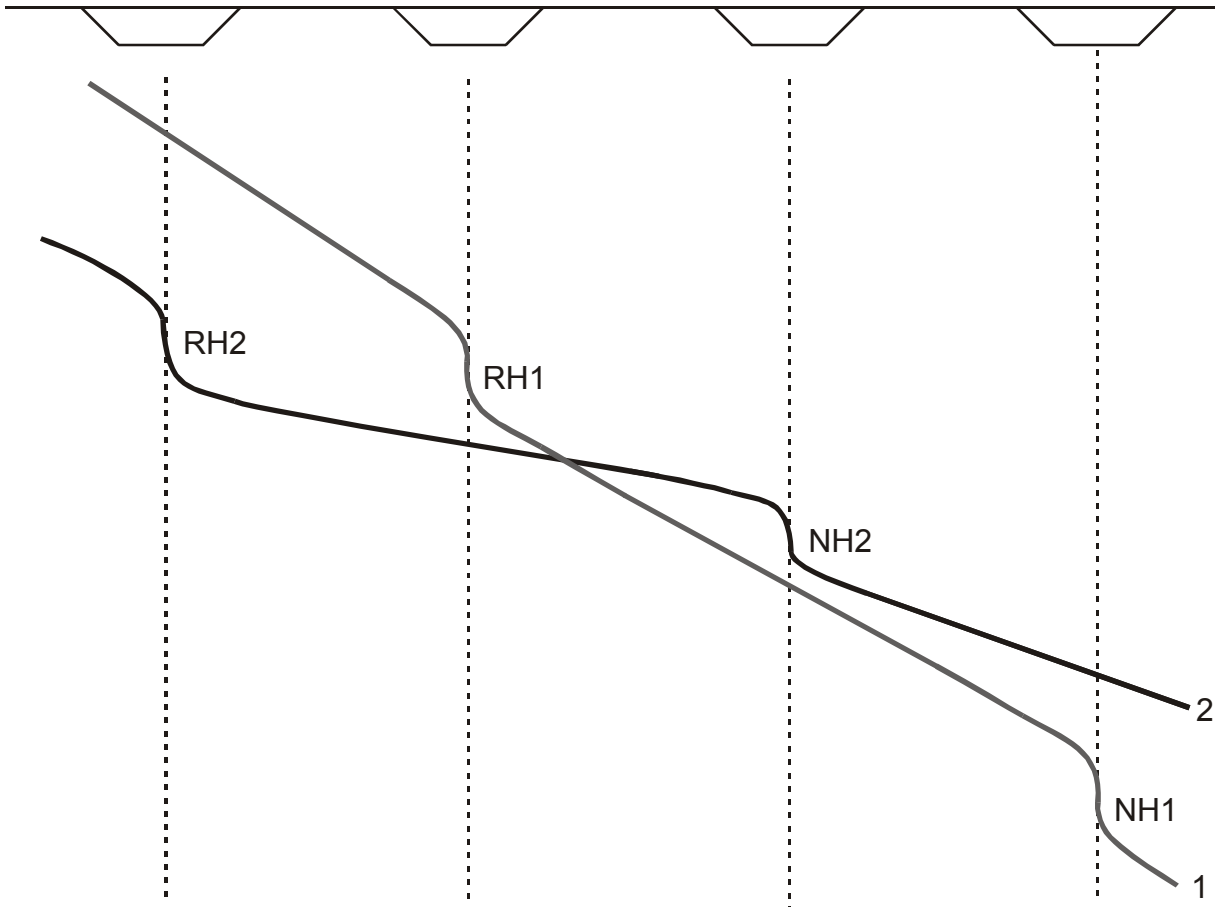

Abb. 21: Überholungsabschnitt bei unterschiedlichen Haltebahnhöfen

6.5.3 Verwendung von Betriebshalten

Bisher wurden nur schon vorhandene Halte der Züge für eine Haltverlängerung ausgewählt. Während bei Güterzügen häufig auch zusätzliche Betriebshalte eingeführt werden, ist dies bei Reisezügen im allgemeinen nicht üblich. Jedoch kann es auch bei Reisezügen, die eine größere Strecke ohne Halt zurücklegen (z. B. IC, …), sinnvoll sein, diese zusätzlichen Betriebshalte einzuführen. Insbesondere bei eingleisigen Strecken ist es gegebenenfalls sogar notwendig, Betriebshalte für diese Züge einzuführen, da so das Problem recht großer Haltezeitverlängerungen vermieden werden kann.

Zur Bestimmung des Überholungsabschnitts wird hier dann der gleiche Algorithmus wie in Abschnitt 6.5.2 verwendet. Allerdings werden beim Durchlaufen der Belegungen der Züge nicht nur die zur Zeit vorhandenen Halte auf Überholungsmöglichkeit geprüft, sondern zusätzlich jede durchlaufene potentielle Haltemöglichkeit. Es wird also nur bis zur ersten Betriebsstelle zurück oder vorwärts gesucht, in der der Zug überholt werden kann. Ansonsten ist der Ablauf des Algorithmus identisch zu dem oben beschriebenen.

6.5.4 Berechnung der „Mindestzugfolgezeiten“

Die „Mindestzugfolgezeiten“, die als Kriterium für die Dispositionsentscheidung verwendet werden, sind bereits aus den analytischen Verfahren zur Berechnung der Leistungsfähigkeit bekannt. So werden diese in den Verfahren STRELE, ALFA und ANKE verwendet. Die in ASDIS verwendeten „Mindestzugfolgezeiten“ stimmen jedoch nicht in allen Fällen mit denen in analytischen Verfahren verwendeten überein. Aus diesem Grund werden hier nochmals speziell diese Unterschiede erläutert. Es mußte ein neuer Algorithmus entwickelt werden, der diese Sonderfälle behandeln kann. Damit hier keine Mißverständnisse auftreten und die „Mindestzugfolgezeiten“ in ASDIS nicht mit denen der analytischen Verfahren verwechselt werden, ist der Begriff Mindestzugfolgezeit genau dann in Anführungszeichen gesetzt, wenn sich Abweichungen ergeben.

Die Mindestzugfolgezeiten werden mit Hilfe der Sperrzeitentreppen berechnet. Hierbei schiebt man die Sperrzeitentreppen beider Züge soweit aneinander, daß sie sich berühren, aber in keinem Block überschneiden. Der Blockabschnitt, an dem sich beide Sperrzeitentreppen berühren, wird als maßgebender Blockabschnitt bezeichnet. Dieser maßgebende Blockabschnitt ist im allgemeinen bei gleichschnellen Zügen der längste Blockabschnitt, im Zugfolgefall „schnell – langsam“ der erste Blockabschnitt und im Zugfolgefall „langsam – schnell“ der letzte Blockabschnitt.

Die Mindestzugfolgezeit wird grundsätzlich am Anfang des Überholungsabschnitts bestimmt. Sie ist die Zeitdifferenz zwischen dem Beginn der Sperrzeit des ersten Zuges und dem Beginn der Sperrzeit des zweiten Zuges. Wenn im nachfolgenden von einer Startbetriebsstelle die Rede ist, so ist immer der Beginn bezogen auf den Überholungsabschnitt gemeint, sie stellt nicht unbedingt auch die Startbetriebsstelle des gesamten Zuglaufs dar. Analog gilt dies für die Betriebsstelle, in der der Zug endet. In den folgenden Abbildungen ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt. Abb. 22 zeigt den Zugfolgefall „langsam – schnell“ und Abb. 23 den Zugfolgefall „schnell – langsam“.

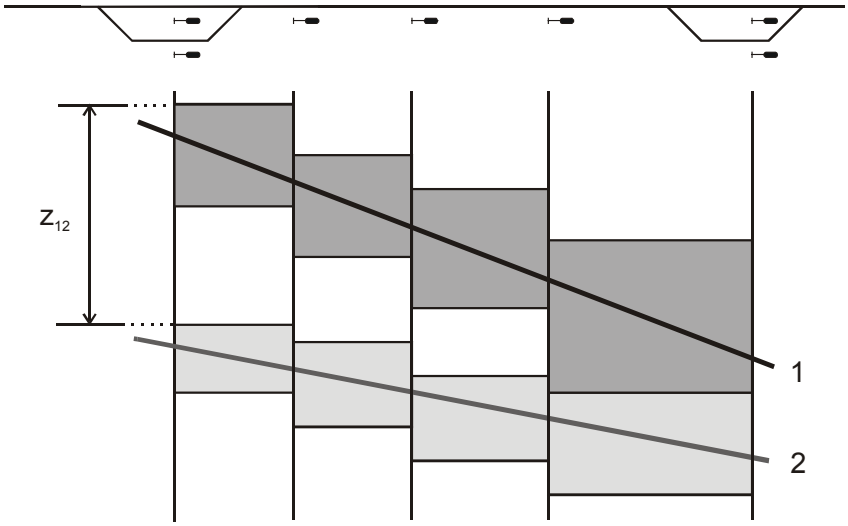

Abb. 22: Mindestzugfolgezeit („langsam – schnell“)

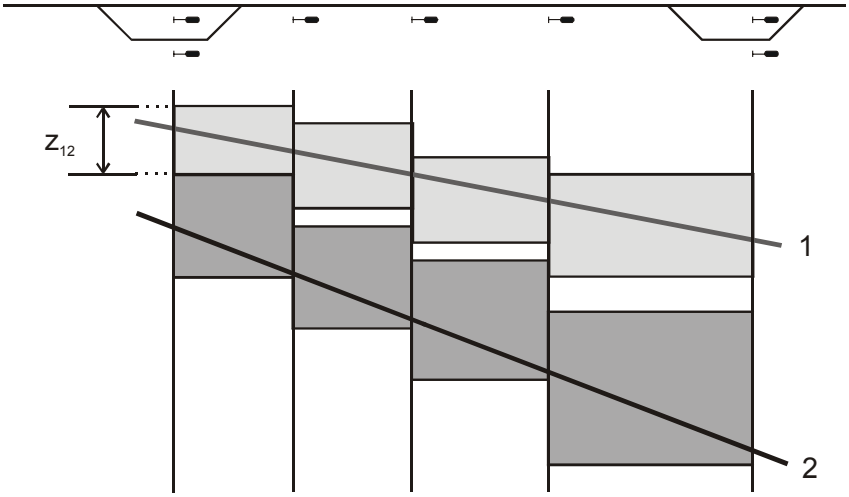

Abb. 23: Mindestzugfolgezeit („schnell – langsam“)

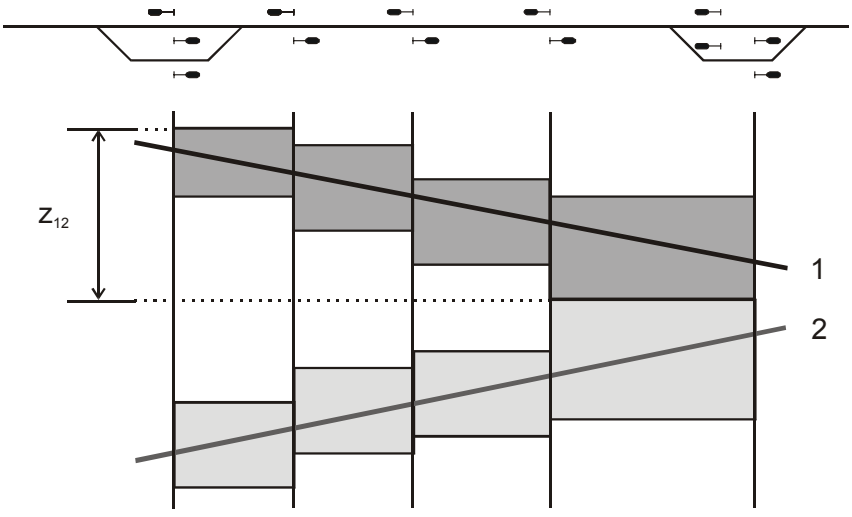

Abb. 24: Mindestzugfolgezeit (kreuzende Züge)

Die Berechnung der Mindestzugfolgezeit zwischen einem Zug und einem anderen Zug der Gegenrichtung geschieht analog. Diese Mindestzugfolgezeit wird insbesondere bei eingleisigen Strecken benötigt und berechnet sich wie in Abb. 24 dargestellt.

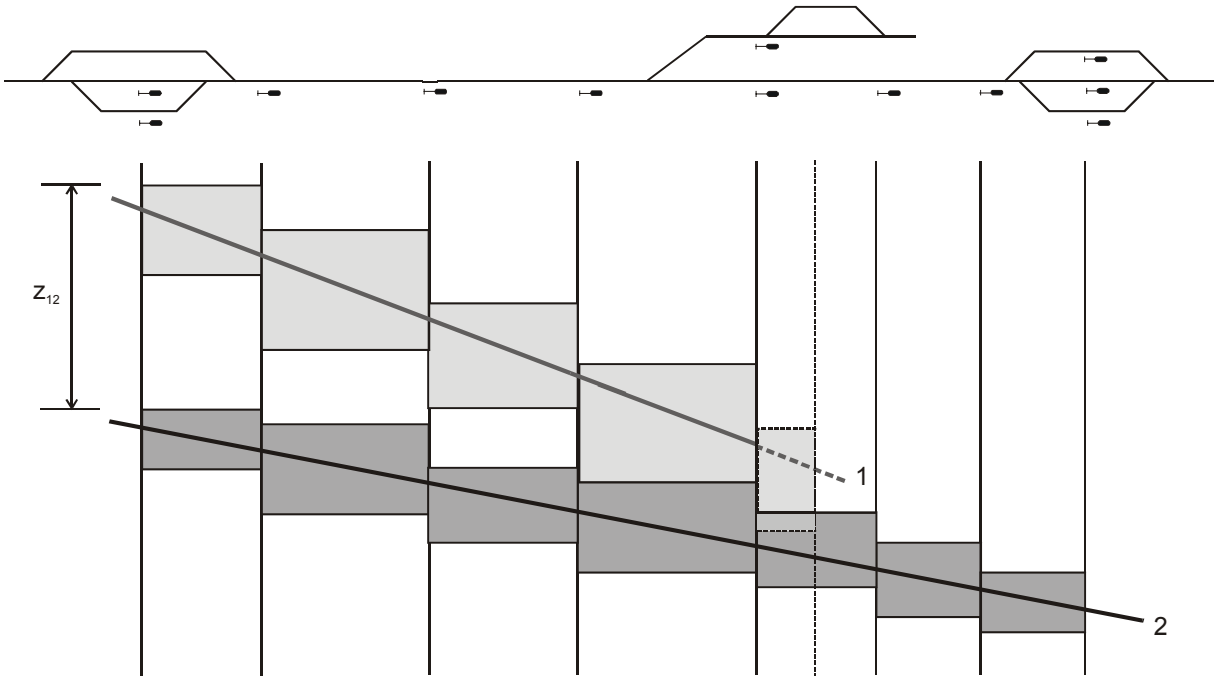

Abb. 25: Mindestzugfolgezeit (trennende Zugfahrten)

In dem in Abb. 25 dargestellten Fall trennen sich die Laufwege beider Züge, d. h. sie beginnen in der gleichen Betriebsstelle, enden jedoch in verschiedenen Betriebsstellen. Die Sperrzeitentreppen werden hier im Bereich des gemeinsam benutzten Streckenabschnitts aneinander geschoben, und die Mindestzugfolgezeit wird in der gemeinsamen Startbetriebsstelle abgelesen.

In den Fällen, in denen beide Züge nicht den gleichen Laufweg ab der vorherigen Halt-Betriebsstelle haben, ergeben sich oben erwähnte Unterschiede in der Berechnung der Mindestzugfolgezeiten.

In Abb. 26 sind zwei sich kreuzende Züge dargestellt, die an zwei verschiedenen Betriebsstellen beginnen und an zwei verschiedenen Betriebsstellen enden. Sie kreuzen sich im Bereich einer Weiche und haben daher auch nur diese Weiche als gemeinsames Belegungselement. Die „Mindestzugfolgezeit“ bestimmt sich wie oben beschrieben durch Aneinanderschieben der Sperrzeitentreppen der gemeinsamen Belegungselemente. Maßgebend sind hier analog zu den obigen Fällen die Anfänge der Sperrzeit im ersten Block, jedoch wird die „Mindestzugfolgezeit“ an den ersten Blöcken der Sperrzeitentreppen in der jeweiligen Betriebsstelle, in der der Zug beginnt, abgemessen. Die „Mindestzugfolgezeit“, die hier in ASDIS verwendet wird, be-

stimmt nun die zeitliche Differenz, um die der Zug 2 an seiner Startbetriebsstelle später losfahren muß als der Zug 1 in seiner Startbetriebsstelle, so daß der Zug 2 ohne Behinderung fahren kann.

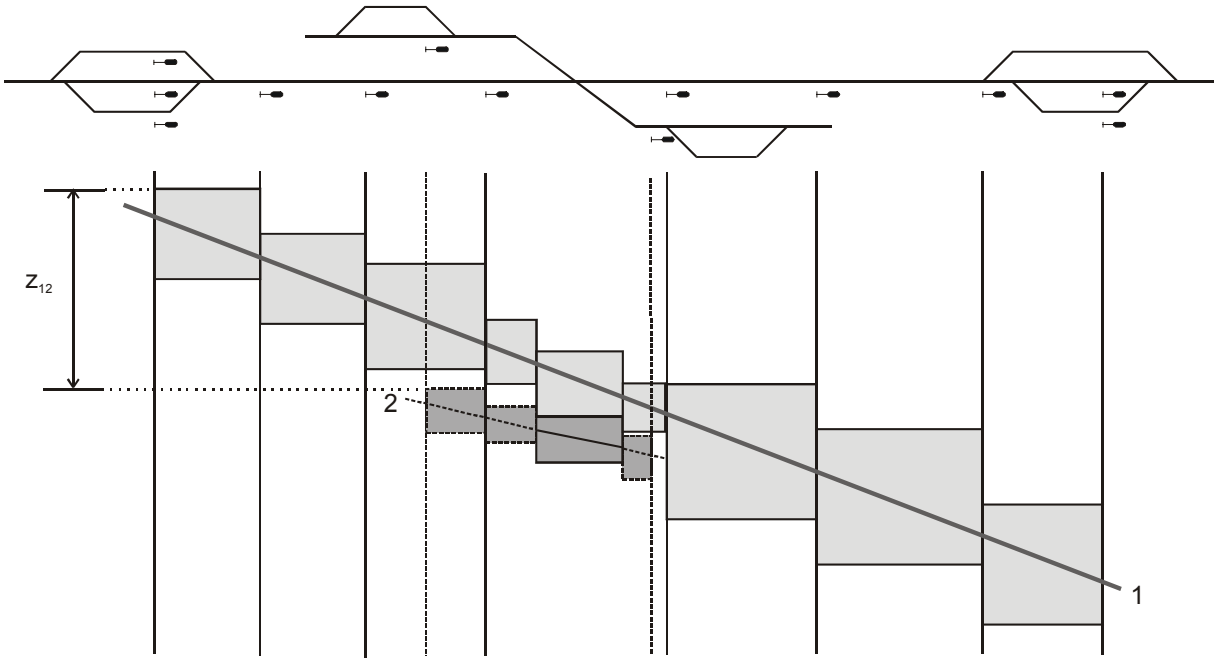

Abb. 26: „Mindestzugfolgezeit“ (kreuzende Zugfahrten)

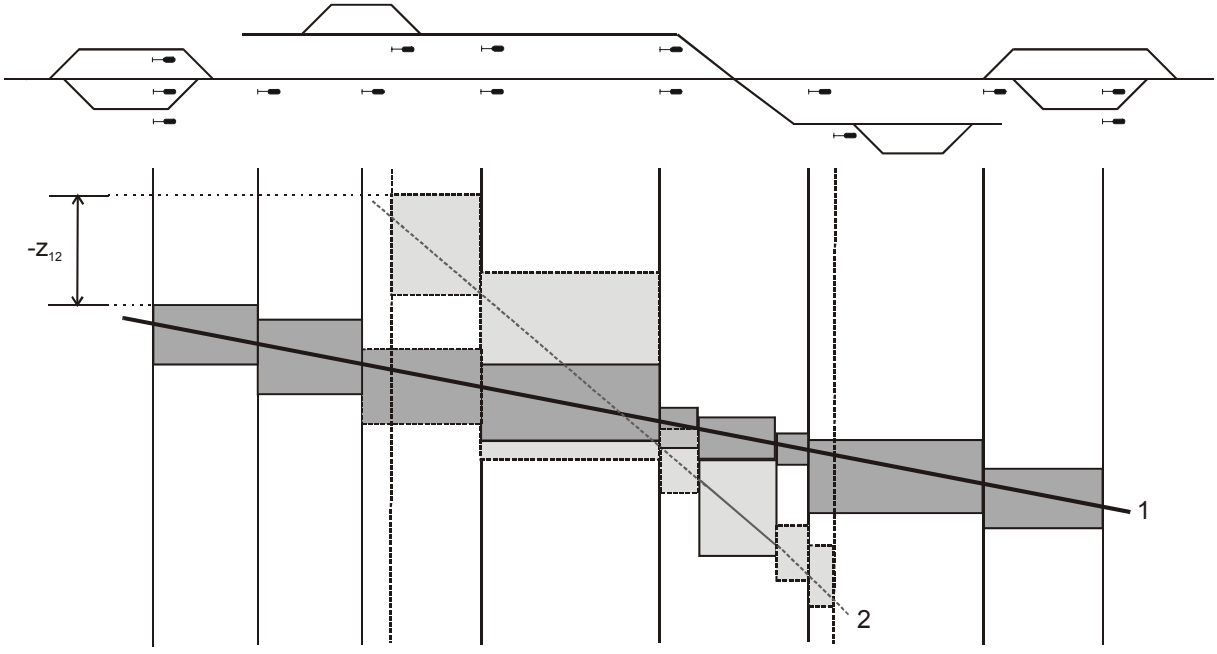

Abb. 27: „Mindestzugfolgezeit“ (kreuzende Zugfahrten, negativ)

In diesen Fällen kann die „Mindestzugfolgezeit“ je nach Lage der betreffenden Betriebsstellen auch gleich Null oder sogar negativ sein. Dies ist dann der Fall, wenn z. B. der Zugfolgefall Zug 1 vor Zug 2 bestimmt werden soll und somit auch an der

Kreuzungsweiche der Zug 1 vor dem Zug 2 liegt, aber in den Startbetriebsstellen der Zug 2 zeitlich vor dem Zug 1 losfährt. In Abb. 27 ist ein solcher Fall einer negativen „Mindestzugfolgezeit“ dargestellt. Hier sei nochmals darauf hingewiesen, daß dieses nicht mehr der Definition der Mindestzugfolgezeit entspricht. Die herkömmliche Berechnung der Mindestzugfolgezeit berücksichtigt nur die Belegungszeit des einzigen gemeinsamen Belegungselements (Kreuzungsweiche).

In Abb. 28 sind zwei Züge dargestellt, die an zwei verschiedenen Betriebsstellen beginnen und sich dann in ihrem Fahrwegverlauf vereinigen. Auch hier werden wieder die Sperrzeitentreppen der gemeinsamen Belegungselemente aneinandergeschoben und die „Mindestzugfolgezeit“ wieder in den Startbetriebsstellen der beiden Züge abgemessen. Maßgebend sind wie oben ebenfalls die Anfänge der Sperrzeiten im ersten Block. Analog zu obigem Beispiel mit der Kreuzungsweiche kann auch hier der Fall auftreten, daß die „Mindestzugfolgezeit“ gleich Null oder auch negativ wird.

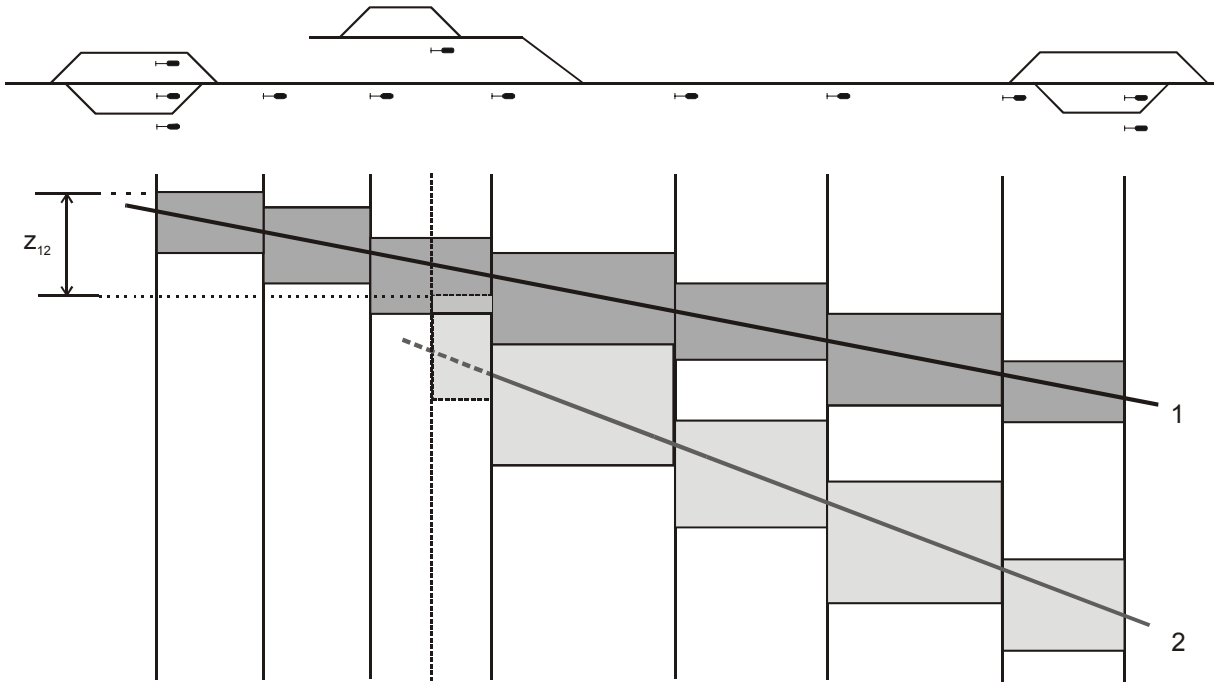

Abb. 28: „Mindestzugfolgezeit“ (vereinigende Zugfahrten)

6.5.5 Entscheidungskriterium, welcher Zug warten muß

Die berechneten „Mindestzugfolgezeiten“ geben an, wie groß die Zeitdifferenz zwischen der Abfahrt zweier Züge sein muß, damit diese sich auf der Strecke nicht behindern. Beispielsweise gibt die „Mindestzugfolgezeit“ z_{ij} an, daß nach Abfahrt des Zuges i diese Zeit verstreichen muß, bis der Zug j abfahren darf. Betrachtet man zusätzlich die Abfahrts- oder Durchfahrtszeiten der Züge in den Bahnhöfen, die vor

dem betrachteten Überholungsabschnitt liegen, so kann man hieraus ein Entscheidungskriterium ableiten.

In Abb. 29 ist die Abfahrts- bzw. Durchfahrtszeit von Zug 1 mit t_1 und die von Zug 2 mit t_2, sowie die „Mindestzugfolgezeiten“ z_{12} für den Zugfolgefall Zug 1 vor Zug 2 und z_{21} für den Zugfolgefall Zug 2 vor Zug 1 bezeichnet. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit sei Zug 1 der gemäß einer zeitlichen Reihenfolge erste Zug von den beiden, so daß die Differenz $X := t_2 - t_1 > 0$ ist. Definiert man nun $Y := z_{12} - X = z_{12} - (t_2 - t_1)$, so kann man diesen Wert mit der „Mindestzugfolgezeit“ z_{21} vergleichen. Liegt der Fall vor, daß $Y < z_{21}$ ist, so wird der Zug 1 bevorrechtigt eingelegt, ansonsten Zug 2. In der Abb. 29 ist der Vergleichswert Y kleiner als die „Mindestzugfolgezeit“ z_{21}. Die Abfahrtszeit von Zug 2 ist später als die von Zug 1, und die „Mindestzugfolgezeit“ z_{12} ist wesentlich größer als die „Mindestzugfolgezeit“ z_{21}. Da in diesem Beispiel Y aber kleiner als z_{21} ist , wird der Zug 1 bei diesem Verfahren bevorrechtigt. Zug 2 muß dann die Kreuzung abwarten und wird erst nach Zug 1 behandelt.

Für den Fall, daß $t_2 - t_1 > 0$ ist, kann man obigen Zusammenhang auch direkt aus einem Vergleich dieser Differenz und der Differenz der „Mindestzugfolgezeiten“ ermitteln. Gilt: $z_{12} - z_{21} < t_2 - t_1$, so wird der Zug 1 bevorrechtigt, im anderen Fall der Zug 2.

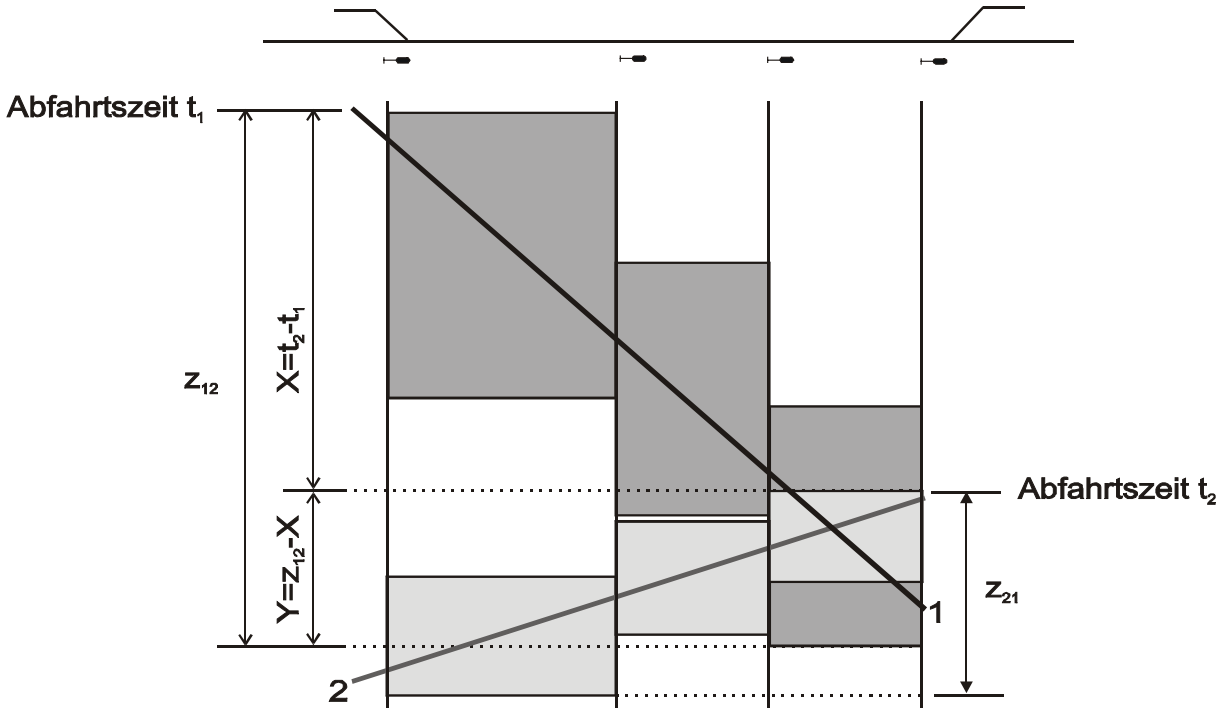

Abb. 29: Zeitdifferenzen für das Entscheidungskriterium

6.5.5.1 Gleiche Priorität beider Züge

Das oben beschriebene Verfahren wird angewendet, wenn die beiden Züge den gleichen Rang besitzen. Bei Gleichrang beider Züge muß der Zug warten, bei dem die Haltezeitverlängerung am kleinsten ist. Es wird also die Konfliktlösung gewählt, für die die Gesamtverspätung ihr Minimum annimmt, da beide Züge die gleiche Priorität besitzen.

6.5.5.2 Unterschiedliche Priorität beider Züge

Auch in diesem Fall wird das obige Verfahren verwendet, jedoch mit folgender Abweichung. Da ein Zug eine höhere Priorität besitzt als der andere, darf der höherrangige Zug gemäß dem asynchronen Verfahren prinzipiell keine Haltezeitverlängerung erfahren. Teilweise treten jedoch relativ geringe Haltezeitverlängerungen für den höherrangigen Zug auf, so daß man hier nachprüfen sollte, ob es nicht sinnvoll ist, dem höherrangigen Zug eine Haltezeitverlängerung zuzumuten. Denn häufig wäre sonst eine relativ hohe Verspätung des niederrangigen Zuges die Konsequenz.

Diese Problematik wird auch als partieller Vorrang bezeichnet, d. h. ein niederrangiger Zug erhält unter bestimmten Umständen und nur in einem temporären Ausnahmefall Vorrang vor einem höherrangigen Zug. Im Regelfall wird versucht, die höherrangigen Züge vor Verspätungen zu schützen; dennoch ist es häufig sinnvoller, den höherrangigen Zug leicht zu verspäten, als dem niederrangigen eine hohe Verspätung zu geben. Es sollte eine Grenze vorhanden sein, bei deren Unterschreitung überprüft wird, ob der partielle Vorrang Anwendung finden kann. In der vorliegenden Programmversion ist diese Grenze mit zwei Minuten vorgegeben; oberhalb dieser Grenze wird der partielle Vorrang nicht angewendet.

Bevor unterhalb dieser Grenze der partielle Vorrang angewendet werden kann, müssen jedoch vorher noch einige Voraussetzungen geprüft werden. Beispielsweise werden für die am Konflikt beteiligten Züge die Prioritäten 6 (höherrangig) und 10 (niederrangig) angenommen. Bei der asynchronen Vorgehensweise sind bereits alle Züge, die einen höheren Rang haben als der niederrangige Zug (also alle Züge mit Rang kleiner 10), eingelegt. Diese Züge sind also schon konfliktfrei im Fahrplan enthalten, bzw. für entstandene Konflikte sind Lösungen gefunden worden. Damit nun diese nicht wieder alle rückgängig gemacht werden müssen, darf die Anwendung des partiellen Vorrangs keine Konflikte verursachen, die zu solchen Problemen führen. Im obigen Beispiel darf deshalb aufgrund der Verschiebung des höherrangigen Zuges (Rang 6) kein Konflikt entstehen, an dem Züge mit Rang kleiner 10 beteiligt sind. Also entstehen nur Konflikte mit Zügen der Rangordnung größer oder gleich 10.

Diese Einschränkung des partiellen Vorrangs, die aufgrund der asynchronen Vorgehensweise allerdings zwingend erforderlich ist, erscheint zunächst recht restriktiv. Da jedoch die Verschiebungszeit minimal ist und der verspätete Zug außerdem die kürzeste Fahrzeit anstrebt, erreicht der Zug schnell wieder seine Fahrplanlage. Dies ist aufgrund der Fahrzeitzuschläge möglich. Der Fahrzeitzuschlag ist ein Zuschlag zur reinen Fahrzeit, um den Verspätungen abgebaut werden können.

Außerdem stoßen im Regelfall die Sperrzeiten der Züge nicht unmittelbar aneinander, sondern es sind noch Lücken zwischen den Sperrzeiten im Fahrplan enthalten, die sogenannten Pufferzeiten. Aus [104] eine Definition der Pufferzeit:

> Die Pufferzeit t_{Pij} ist die Zeit, um die ein vorausfahrender Zug i verspätet sein darf, ohne einen nachfahrenden, pünktlichen Zug j zu behindern bzw. ohne einen Reihenfolgewechsel j-i zu bewirken.

Diese Pufferzeiten, die in jedem qualitativ guten Fahrplan enthalten sind, dienen dazu, daß kleine Verspätungen nicht unmittelbar auf nachfolgende Züge übertragen werden. Da diese auch im Betriebsablauf noch vorhanden sind – es sei denn, sie wurden schon für eine vorherige Konfliktlösung verwendet –, können die Pufferzeiten natürlich auch hier beim partiellen Vorrang genutzt werden.

Während die Pufferzeiten lediglich die Verspätungsübertragung dämpfen, ermöglichen die Fahrzeitzuschläge den Abbau von Verspätungen. Bei der DB Netz AG werden grundsätzlich Pufferzeiten von mindestens einer Minute zwischen den Sperrzeitentreppen vorgesehen, für bestimmte Zugfolgefälle wird die Pufferzeit auf mindestens zwei Minuten erhöht [22]. Zur Bemessung von Pufferzeiten im Fahrplan sei hier auf [91] verwiesen.

Insgesamt hat sich an mehreren Beispielen gezeigt, daß der partielle Vorrang trotz obiger Einschränkung bei kleinen Verspätungen häufig angewendet werden kann. Die Zeitschranke für den partiellen Vorrang sollte geeignet gewählt werden. Da der Test auf Konfliktfreiheit mit anderen Zügen nur gemacht werden kann, wenn der Zug probeweise schon eingelegt ist, und dann gegebenenfalls wieder rückgängig gemacht werden muß, ist dieses Verfahren zeitaufwendig. Die Zeitschranke sollte ungefähr der Größe der vorhandenen mittleren Pufferzeit entsprechen, die natürlich je nach Strecke variieren kann. Es hilft nicht, die Zeitschranke wesentlich größer als diese Pufferzeit zu wählen, da sonst häufig der Test auf Konfliktfreiheit zu häufig fehlschlagen würde.

6.5.6 Haltezeitverlängerung bestimmen

Das obige Entscheidungskriterium (siehe Abschnitt 6.5.5) liefert nicht nur eine Entscheidung, welcher Zug bevorrechtigt werden soll, sondern man kann aus den ermittelten Werten auch gleich die notwendige Haltezeitverlängerung bestimmen.

Für den Fall $z_{12} – z_{21} < t_2 – t_1$ wird unter der Voraussetzung $t_2 – t_1 > 0$ der Zug 2 wie oben beschrieben verschoben. Seine notwendige Verschiebungszeit beträgt dann $V = z_{12} – (t_2 – t_1)$, d. h. sie läßt sich unmittelbar aus der „Mindestzugfolgezeit“ und der Differenz der Abfahrts- bzw. Durchfahrtszeiten ableiten. Im anderen Fall, also wenn $z_{12} – z_{21} > t_2 – t_1$ ist, muß Zug 1 um $V = z_{21} + (t_2 – t_1)$ verschoben werden. Diese Verschiebungszeit wird dann als Haltezeitverlängerung in dem zurückliegenden Halt des Zuges realisiert. Falls die Option für Betriebshalte ausgewählt wurde, wird hierbei dann, falls noch kein Halt in dieser Betriebsstelle vorhanden ist, ein zusätzlicher Betriebshalt mit der oben ermittelten Haltezeit eingelegt.

6.5.7 Fahrwegalternativen suchen

In diesem Abschnitt wird erläutert, wann und in welcher Art nach Fahrwegalternativen gesucht wird. Gemäß dem in Abschnitt 6.5.5 erläuterten Kriterium wurde entschieden, welcher Zug im vorliegenden Konfliktfall bevorrechtigt eingelegt wird. Für den anderen am Konflikt beteiligten Zug werden nun zunächst Fahrwegalternativen bestimmt. Da die Fahrwegsuche mit dem in Abschnitt 6.2 vorgestellten Algorithmus recht zeitaufwendig ist, wurde eine Zeitschranke eingeführt, bis zu der die Fahrwegsuche nicht angewendet wird. Erst wenn die ermittelte Haltezeitverlängerung größer als diese Schranke ist, werden Fahrwegalternativen gesucht. Unterhalb der Schranke wird die ermittelte Haltezeitverlängerung direkt verwendet, um den Konflikt zu lösen. Zur Zeit ist diese Schranke in ASDIS auf eine Minute festgelegt.

Nun werden die Fahrwegalternativen mit dem obigen Algorithmus bestimmt. Damit der aktuelle Fahrweg später rekonstruiert werden kann, muß er zwischengespeichert werden. Jeder einzelne Alternativfahrweg wird nun nacheinander ausprobiert, d. h. der Zug erhält den neuen Fahrweg, und es wird eine Fahrzeit- und Belegungsrechnung durchgeführt, um die neuen Fahrzeiten sowie die Belegungszeiten der Belegungselemente zu erhalten. Anschließend wird jeweils die Haltezeitverlängerung bestimmt. Nachdem dies für alle möglichen Fahrwege gemacht wurde, liegen verschiedene Lösungsalternativen vor, d. h. zu den jeweiligen Fahrwegen wurden die Informationen bestimmt, die für eine Entscheidungsfindung, welche Konfliktlösung den Vorzug erhält, genutzt werden können. Hier sind beispielsweise zu nennen: die Fahrzeitänderung aufgrund des abweichenden Fahrweges (im Regelfall Fahrzeitver-

längerung), die notwendige Haltezeitverlängerung auf diesem Fahrweg (die im günstigem Fall auch gleich Null sein kann) und die Prioritätenfolge des Fahrweges (da gegebenenfalls nicht nur in einer Betriebsstelle der Fahrweg geändert werden mußte, liegt hier eventuell eine Liste von Prioritäten der verwendeten Fahrwege vor; im günstigsten Fall ist dies nur ein Wert, falls der Fahrweg ausschließlich in einer Betriebsstelle verändert werden mußte). Diese Daten liegen natürlich auch für den bisherigen Fahrweg des Zuges vor, so daß auch dieser mit den Kriterien verglichen werden kann. Aufgrund dieser Informationen wird nun entschieden, welcher der bevorzugte Fahrweg ist. Zur Zeit wird hier der Fahrweg mit der kleinsten Haltezeitverlängerung gewählt. Da aber alle Daten zur Entscheidungsfindung ermittelt wurden, kann hier auch eine komplexere Bewertung der Alternativen durchgeführt werden.

Zur Berücksichtigung der Prioritäten ist es erforderlich, die einzelnen Fahrwege entsprechend ihrer Hierarchie bereits bei der SPURPLAN-Eingabe zu klassifizieren. Zumindest sollten die vorgegebenen Prioritätsklassen durchgehendes Hauptgleis, richtig liegendes Überholungsgleis, falsch liegendes Überholungsgleis und mittig liegendes Überholungsgleis korrekt vergeben werden. Denn nur durch diese Prioritätsziffer können die Fahrwege bei der automatischen Konfliktlösung sinnvoll sortiert werden. Denn in großen Eisenbahnknoten existieren unter Umständen sehr viele Fahrwegalternativen, die bei einer Konfliktlösung nach ihrer Hierarchie sortiert und dann in dieser Reihenfolge ausprobiert werden. Somit kann dann auch ein Abbruchkriterium eingesetzt werden, um unnötiges Austesten niederrangiger Fahrwege ausschließen zu können.

Des weiteren ist es auch möglich, durch Veränderung der Prioritäten der einzelnen Fahrwege überlastete Weichenbereiche zu meiden. Die Ausweichfahrwege, die über stark belastete Weichenbereiche führen können dann eine niedrige Priorität erhalten, so daß zunächst andere Fahrwege ausprobiert werden, die über schwächer belastete Weichenbereiche führen. Zur Bestimmung der Auslastungsgrade einzelner Weichenbereiche können die eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Verfahren eingesetzt werden. Dies kann beispielsweise mit analytischen Verfahren (z. B. ALFA, ANKE, STRELE) oder mit Simulationsverfahren (z. B. BABSI, STRESI, NSIM) ermittelt werden ([35], [89], [95], [100], [101] und [106]).

Der Zug erhält nun den Fahrweg der ermittelten Konfliktlösung, und die notwendige Verlängerung der Haltezeit wird in der betroffenen Betriebsstelle eingerichtet. Es kann natürlich auch der Fall auftreten, daß in einem Fahrweg eine Haltezeitverlängerung nicht möglich ist. In diesem Fall scheidet der Fahrweg aus und wird nicht weiter betrachtet. Dies kann z. B. dann der Fall sein, wenn das Gleis ab einem späteren Zeitpunkt, der durch die Verlängerung der Haltezeit nunmehr in die Haltezeit eines

anderen Zuges fällt, nicht mehr zur Verfügung steht, weil dann der andere Zug dieses Gleis belegt. Ist auf dem ursprünglichen Fahrweg des Zuges und auf allen gefundenen Alternativfahrwegen keine Haltezeitverlängerung möglich, kann in dem vorgegebenen Überholungsabschnitt keine Konfliktlösung gefunden werden. In diesen Fällen ist es erforderlich, den Überholungsabschnitt zu erweitern. Wie dies geschieht, wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

6.5.8 Erweiterung des Überholungsabschnitts

Es kann der Fall auftreten, daß eine Haltezeitverlängerung in der oben ermittelten Betriebsstelle nicht möglich ist, d. h. auf dem ursprünglichen Fahrweg und auf allen Alternativfahrwegen in der Betriebsstelle ergibt sich aufgrund von anderen Zügen direkt ein neuer Konflikt. Dann muß der gewählte Überholungsabschnitt erweitert werden. Mit dem in Abschnitt 6.5.2 vorgestellten Algorithmus wird eine jeweils weiter „außen“ liegende Betriebsstelle gesucht (siehe Abb. 30).

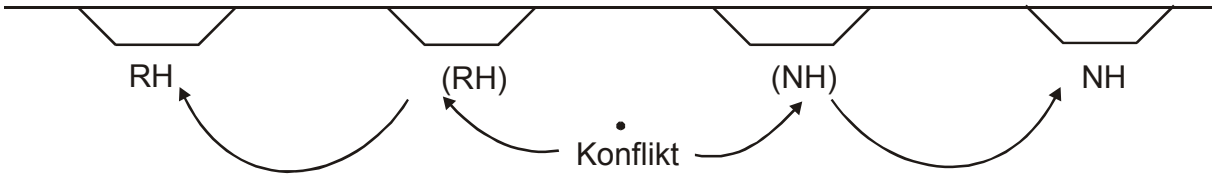

Abb. 30: Erweiterung des Überholungsabschnitts

Der Algorithmus liefert dann nicht die jeweils ersten Betriebsstellen, an der der Zug einen Halt hat und eine Überholungsmöglichkeit besteht, sondern die jeweils nächsten. Wenn man die Konfliktstelle mit „innen“ bezeichnet, liefert der Algorithmus dann die nächsten Betriebsstellen außen.

Mit diesen beiden neuen Betriebsstellen als Grenzen des Überholungsabschnitts wird nun wie oben beschrieben verfahren. Dabei kann es natürlich vorkommen, daß hierbei auch noch keine Lösung gefunden wird, dann muß dieses Procedere wiederholt angewendet werden.

Bei der Disposition kann der Überholungsabschnitt nach vorne – in die Zukunft – beliebig erweitert werden, nach hinten – in die Vergangenheit – natürlich nicht über die aktuelle Zeit hinaus, da das in Realität schon stattgefundene Betriebsgeschehen nicht wieder rückgängig gemacht werden kann.

6.6 Ablaufdiagramm des Algorithmus

Im Ablaufdiagramm in Abb. 31 wird der Algorithmus näher dargestellt. Dieser Algorithmus dient zur Auswahl der besten Konfliktlösung. Hierin wird erläutert, in welcher Reihenfolge die einzelnen Schritte zur Konfliktlösungssuche ablaufen.

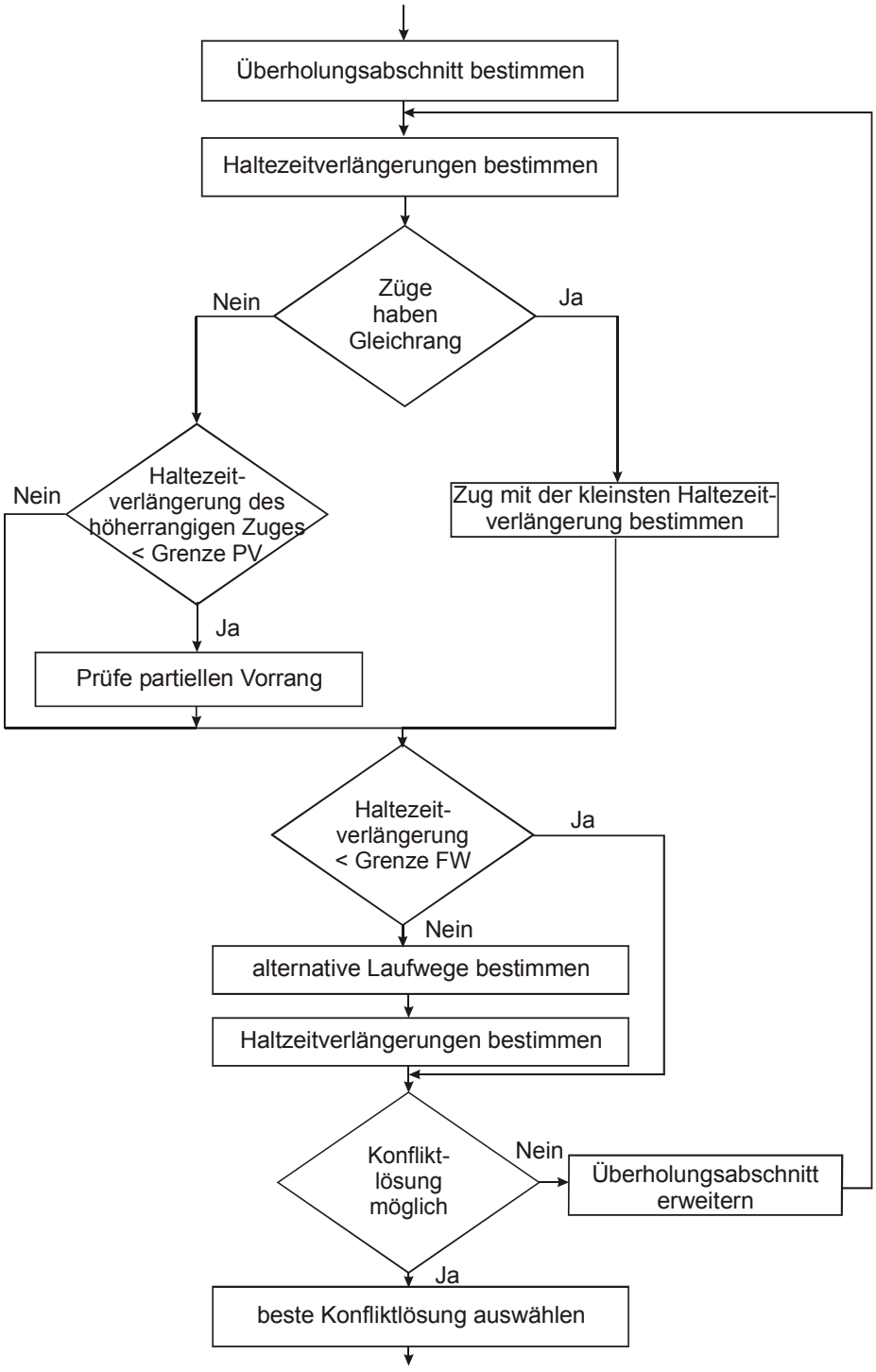

Abb. 31: Ablaufdiagramm

6.7 Synchrones Element in asynchronen Verfahren

Der Konfliktlösungsalgorithmus behandelt im Regelfall die Zugfahrten nach dem asynchronen Verfahren. Hierdurch läßt sich auch der überwiegende Teil aller Störungen abbilden. Für sehr kurzfristig auftretende Störungen kann es jedoch erforderlich sein, den asynchronen Pfad zu verlassen und synchron vorzugehen. Ein Vorteil der synchronen Modelle ist es, aufgrund ihrer Vorgehensweise in Zeitschritten auf unmittelbare Störungen direkt reagieren zu können. Jedoch ist es auch möglich in einem asynchronen Algorithmus für gewisse Fälle synchrone Elemente einfließen zu lassen. Eine solche Erweiterungsmöglichkeit soll in diesem Abschnitt erläutert werden.

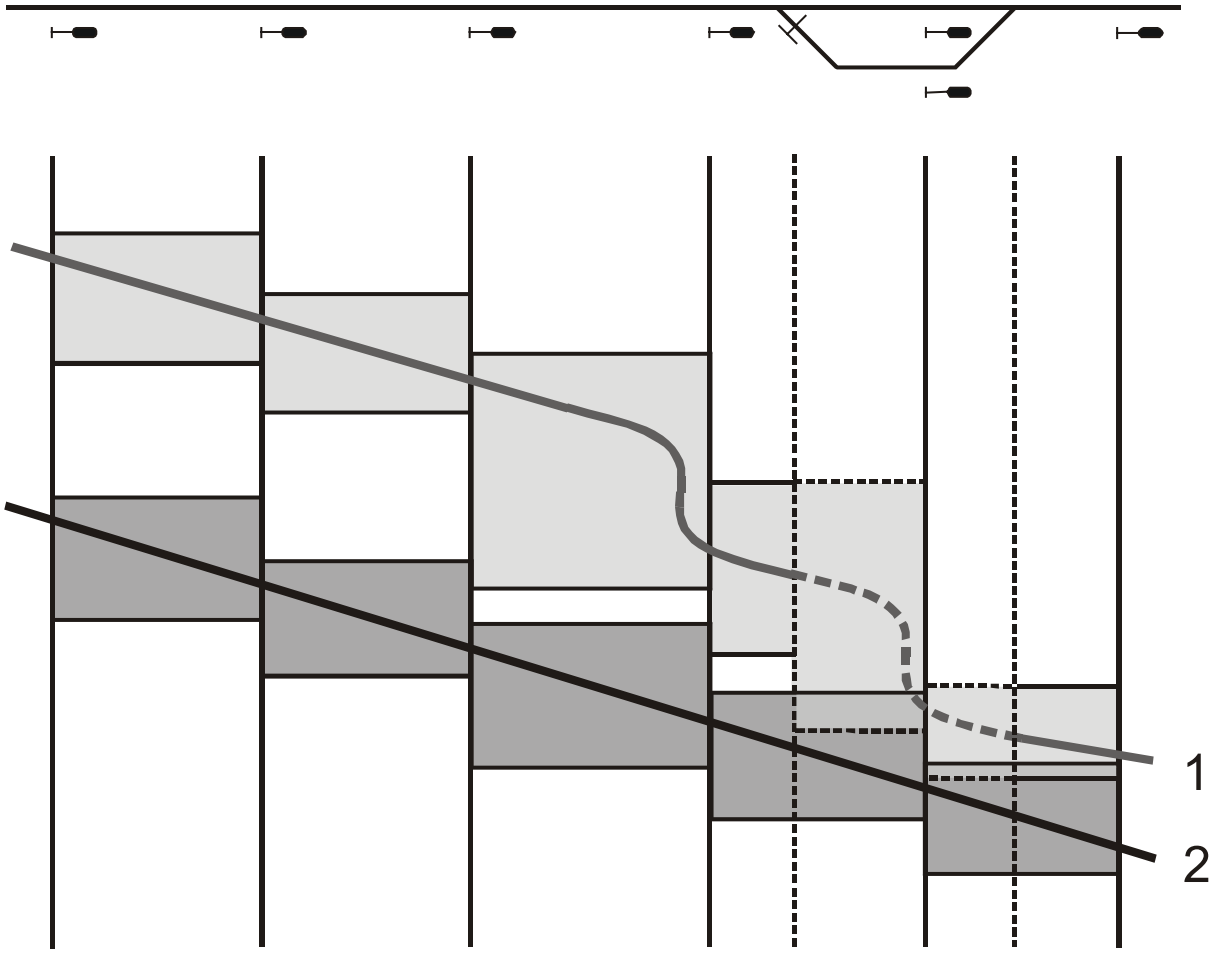

Abb. 32: kurzzeitige synchrone Vorgehensweise (Konflikt)

Nach dem asynchronen Verfahren werden die Zugfahrten nach ihrer Priorität eingelegt. Bevor also beispielsweise die Züge mit Rangziffer 10 betrachtet werden, sind die Züge mit höherer Priorität (Rangziffer 2, 4, …) schon im Fahrplan eingelegt. Falls nun ein Zug der Rangziffer 10 eine kurzfristig auftretende Störung erleidet, kann es

sein, daß auch höherrangige Züge davon betroffen sind. In Abb. 32 ist der höherrangige Zug 2 schon eingelegt, bevor der niederrangige Zug 1 angefaßt wird. Dieser niederrangige Zug 1 trifft ein gestörtes Einfahrsignal an, an dem er eine Wartezeit erleidet. Der nachfolgende, höherrangige Zug 2 hat den letzten zurückliegenden Bahnhof, an dem er noch hätte aufgehalten werden können, bereits verlassen und befindet sich schon in dem Streckenabschnitt, in dem der Zug 1 noch vor dem Einfahrsignal warten muß.

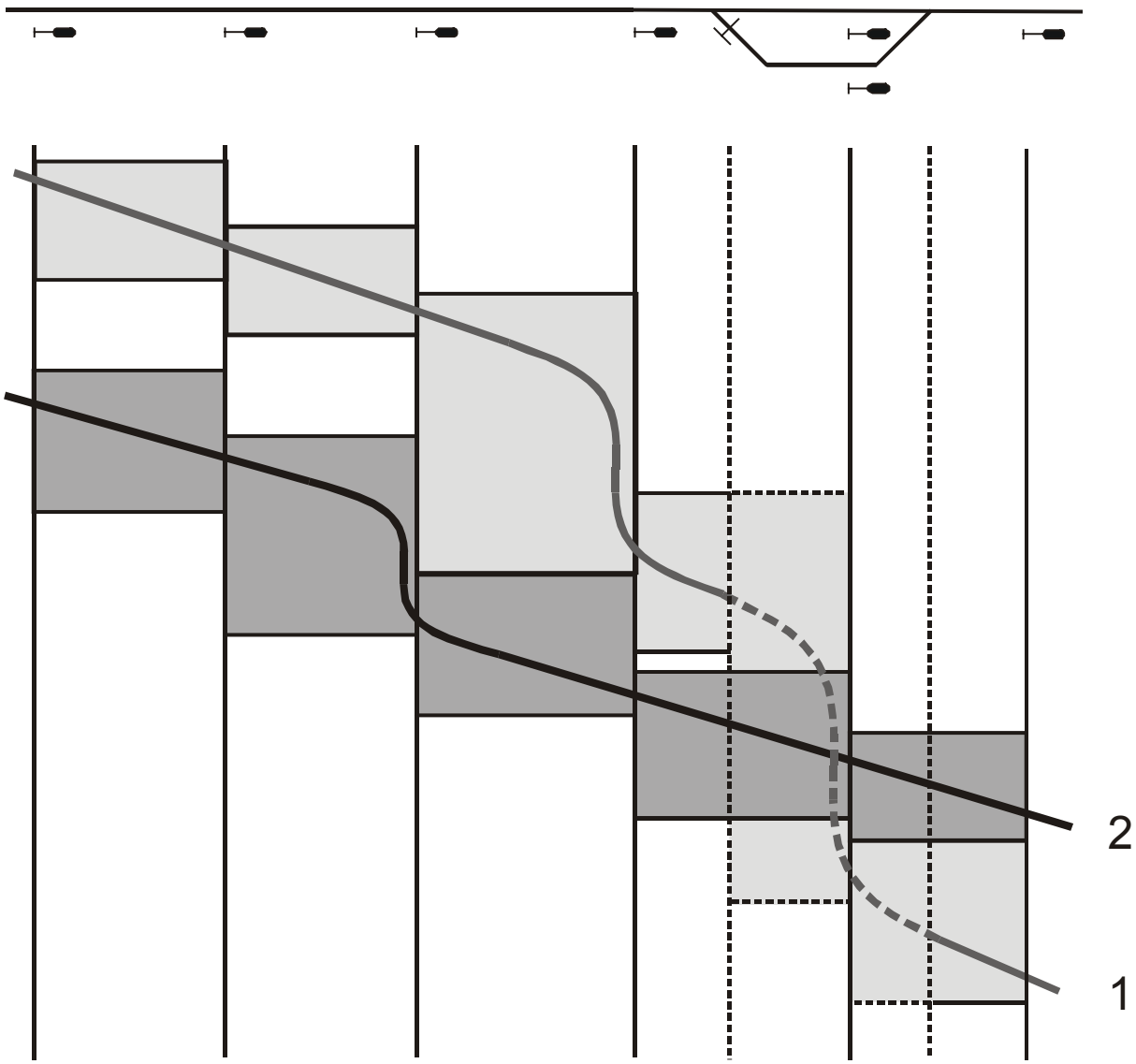

Abb. 33: kurzzeitige synchrone Vorgehensweise (Konfliktlösung)

In einem solchen Fall muß auch der höherrangige Zug 2 nochmals angefaßt werden und gegebenenfalls am vorherigen Blocksignal warten, bis der Zug 1 den nachfolgenden Block geräumt hat. Zug 2 muß nun trotz höherer Priorität hinter dem Zug 1 bis zur nächsten Überholungsmöglichkeit folgen. An diesem Überholungsbahnhof kann dann die Reihenfolge der Züge getauscht werden und der höherrangige Zug

seine Fahrt unbehindert fortsetzen. Die so entstandene Konfliktlösung ist in Abb. 33 dargestellt.

Solange hier nur ein nachfolgender höherrangiger Zug betroffen ist, kann dieser unmittelbar angefaßt und bearbeitet werden, so daß eine Konfliktlösung erzielt werden kann. Es kann jedoch auch der Fall auftreten, bei dem entweder dieser Zug noch weitere Konflikte in seinem Zuglauf bewirkt, oder aber auch noch andere nachfolgende hochrangige Züge betroffen sind. In einem solchen Fall muß der Dispositionsfahrplan nochmals neu erstellt werden.

Dann muß die Sperrzeitentreppe des Zuges 1, der die Störung und die daraus resultierende Verspätung am Einfahrsignal erleidet, als erstes eingelegt werden. Hierzu ist die Priorität des Zuges auf die höchste Prioritätsstufe zu setzen, und zwar bis zur nächsten Überholungsmöglichkeit des Zuges nach der Störung. Ab hier wird dann wieder die für diesen Zug ursprünglich festgelegte Rangziffer verwendet.

Durch diese Rangordnungsänderung können auch in asynchronen Verfahren kurzfristig auftretende Störungen berücksichtigt werden. Hierdurch kann eine notwendige kurze synchrone Vorgehensweise in einem vom Grundsatz her asynchronen Algorithmus behandelt werden.

6.8 Behandlung von Anschluß- bzw. Umlaufkonflikten

In den bisherigen Abschnitten wurde für Belegungskonflikte eine Konflikterkennung und -lösung realisiert. Es verbleiben noch die Anschluß- und Umlaufkonflikte, die ebenfalls erkannt und gelöst werden müssen.

In der Fahrlagenplanung werden neben den Abfahrtszeiten der Züge auch die Abschlußbindungen zwischen den Zügen festgelegt. Die EVU bestellen bei der DB Netz AG nicht nur eine Fahrplantrasse, sondern es werden auch die gewünschten Anschlüsse vereinbart, die bei der Fahrplanfeinkonstruktion im Trassenmanagement berücksichtigt werden sollen. Um einen möglichst effizienten Eisenbahnbetrieb zu gewährleisten, ist eine Planung der Betriebsmittel eines jeden EVU unabdingbar. Die Betriebsmittel stellen dabei sowohl das Fahrzeugmaterial als auch die Personale dar. Hier müssen die Loks, Wagen oder Triebzüge in einen Umlaufplan integriert werden, so daß nur geringe Verlustzeiten zwischen den einzelnen Zugfahrten auftreten. Ebenso ist für die Lokführer und Zugbegleiter ein Umlaufplan zu erarbeiten.

Bei der Fahrplanfeinkonstruktion werden die Anschluß- und Umlaufbedingungen zwar beachtet, jedoch im Regelfall dann nicht weiter in FAKTUS/RUT-0 vermerkt, so

daß sie nach Abschluß der Fahrplankonstruktion nicht mehr zur Verfügung stehen. Insbesondere werden bei der Übergabe des aktuellen Fahrplans an die Betriebszentralen diese Anschluß- und Umlaufinformationen nicht weitergereicht. Zur Zeit werden daher in der BZ neue Anschlußbindungen generiert, wobei hier dann alle möglichen Anschlüsse aufgenommen werden, die sich aufgrund des Fahrplans ergeben. Damit existieren dann auch Bindungen, die vom EVU eigentlich gar nicht bestellt (oder gewünscht) waren.

Durch Verspätungen im Betriebsablauf können die Anschluß- oder Umlaufbedingungen verletzt werden, in diesem Fall spricht man von Anschluß- oder Umlaufkonflikten. Bei der Disposition gilt es auch diese Konfliktarten zu lösen.

Damit die Verspätungen sich nicht netzweit übertragen, existieren in den Wartezeitregelungen (siehe Abschnitt 2.3.2) Vorgaben für die in der Regel abzuwartende Zeit auf einen verspäteten Anschlußzug. Falls bei der Disposition erkannt wird, daß die Übergangszeit zwischen zwei Zügen aufgrund von Verspätungen überschritten wird, kann diese Regelwartezeit verwendet werden, um die Haltezeit des Anschlußzuges zu verlängern. Wird die Regelwartezeit überschritten, so muß der Anschluß entfallen.

Liegen dem Disponenten nähere Information über Anschlußreisende oder andere Umstände vor, so kann er in Absprache mit dem oder den betroffenen EVU auch die Vorgaben über die Anschlußbindung ändern, d. h. entweder den Anschluß auch ohne Regelwartezeit entfallen lassen oder aber die Regelwartezeit verlängern.

Eine andere Alternative ist es, die Hierarchien der am Anschlußkonflikt beteiligten Züge zu ändern. Falls ein Zug eine Verspätung besitzt und somit einen planmäßigen Anschlußzug nicht mehr erreicht, kann die Priorität des verspäteten Zuges erhöht werden. Durch die höhere Hierarchie kann der Zug gegebenenfalls seine Verspätung reduzieren, da er dadurch Vorrang vor anderen Zügen erhält. Im Extremfall kann für den verspäteten Zug die höchste Rangstufe gewählt werden. Mit dieser hat er Vorrang vor allen anderen Zügen und erreicht den Anschlußbahnhof zum frühest möglichen Zeitpunkt, die aufgrund der aktuellen Verspätung erzielbar ist.

Prinzipiell gelten obige Bemerkungen für Anschlußkonflikte auch für Umlaufkonflikte. Der wesentliche Unterschied ist allerdings, daß der Anschluß nicht einfach aufgegeben werden kann, denn schließlich ist das für den Anschlußzug notwendige Fahrzeug noch nicht angekommen. Daher entfällt diese Variante im Regelfall, wenn kein entsprechendes Ersatzfahrzeug zur Verfügung steht. Da dies dem Dispositionssystem aber nicht bekannt ist, muß in diesen Fällen der Disponent nach Rücksprache mit dem EVU eine Entscheidung treffen.

6.9 Kommunikation mit dem realen Betriebsgeschehen

In diesem Abschnitt soll die Kommunikation von ASDIS mit dem realen Betriebsablauf beschrieben werden. An erster Stelle sind hier die Zuglaufmeldungen zu nennen, die von ASDIS benötigt werden, um die Zugstandorte bestimmen zu können. Anhand des Vergleichs der Zuglaufmeldungen mit den intern prognostizierten Zuglaufmeldungen muß ASDIS dann entsprechend reagieren.

6.9.1 Zuglaufmeldungen

In der Realität werden die Zuglaufmeldungen durch die Stellwerke beim Haltfall des entsprechenden Signals erzeugt und über die Zugnummernmeldeanlage weitergeleitet. Da jedoch der Zeitpunkt des Signalhaltfalls je nach Signal variiert und deshalb hier nicht eindeutig festgelegt werden kann, wurde für die Testumgebung der Zeitpunkt gewählt, zu dem die Zugspitze den Signalstandort erreicht hat. Hierdurch erreicht man für die Testumgebung eine exakte Möglichkeit, den Zug zu orten. Die Abweichung zur Realität ist dabei hinreichend gering. Selbstverständlich kann man dies noch verfeinern, wenn man genauere Informationen bezüglich des Signalhaltfalls der einzelnen Signale hat.

Die Zuglaufmeldungen werden jeweils bei der Fahrzeitrechnung gespeichert, wenn man im Laufe der Rechnung auf ein Hauptsignal trifft. Diese dann für jeden Zug ermittelten Zuglaufmeldungen müssen in die Liste nach Zeitpunkten sortiert eingetragen werden. Damit dies schon während der Fahrzeitrechnung geschehen kann, waren auch hier entsprechende Erweiterungen und Ergänzungen in der Fahrzeit- und Belegungsrechnung erforderlich.

6.9.2 Übernahme der Fahrplandaten

Aufgrund der übermittelten Zuglaufmeldungen können Konflikte auftreten, die in ASDIS gelöst werden. Dabei wird in ASDIS gegebenenfalls ein neuer, konfliktfreier Fahrplan erzeugt, der dann nach LeiDis-S/K übertragen werden muß.

6.9.3 Bestimmung der zu erwartenden Zuglaufmeldungen

In ASDIS werden die zu erwartenden Zuglaufmeldungen bestimmt. Hier werden bei der Fahrzeitrechnung die Zuglaufmeldungen in die Liste geschrieben, die von ASDIS aufgrund des aktuellen Fahrplans erwartet werden. Diese sind ebenfalls in ihrer zeit-

lichen Reihenfolge sortiert, und es kann mit geringem Aufwand geprüft werden, ob die erhaltene Zuglaufmeldung mit der erwarteten übereinstimmt.

6.9.4 Vergleich der Zuglaufmeldungen

In diesem Abschnitt wird beschrieben, welche Resultate sich aus dem Vergleich der Zuglaufmeldungen ergeben können. Falls eine Zuglaufmeldung erhalten wurde, wird diese mit der zuvor bestimmten Zuglaufmeldung verglichen, d. h. aufgrund der Zugnummer und der Signalbezeichnung in der übergebenen Zuglaufmeldung wird in der ASDIS-internen Liste nach der entsprechenden Zuglaufmeldung gesucht und die beiden Zeiten (in der übernommenen und in der berechneten Liste) miteinander verglichen. Nun können die beiden folgenden Fälle auftreten: Entweder beide Zeiten sind identisch oder sie weichen voneinander ab. Einer dieser beiden Fälle kann allerdings nur dann eintreten, wenn überhaupt eine Zuglaufmeldung eingegangen ist. Außerdem kann der Fall auftreten, daß eine Zuglaufmeldung überfällig ist, d. h. ASDIS eine Zuglaufmeldung erwartet, die dann aber nicht kommt.

6.9.4.1 Zuglaufmeldung kommt zum erwarteten Zeitpunkt

Wenn die Zuglaufmeldung zum erwarteten Zeitpunkt eintrifft, handelt es sich um den einfachsten Fall. In der Liste wird dann vermerkt, daß die Meldung eingetroffen und verarbeitet worden ist. Hierbei bedeutet „zum erwarteten Zeitpunkt“, daß die Zeitdifferenz beider Zuglaufmeldungen eine gewisse Zeitschranke nicht überschreitet. Zur Zeit ist diese Zeitschranke in ASDIS auf eine halbe Minute gesetzt, d. h. wenn die erhaltene Zuglaufmeldung um weniger als eine halbe Minute von der berechneten Zuglaufmeldung abweicht, wird dies als korrekt befunden. Dabei kann die Abweichung in beide Richtungen vorkommen, entweder die erhaltene Zuglaufmeldung ist eine halbe Minute zu früh oder zu spät. In beiden Fällen wird dies akzeptiert, und ASDIS vermerkt in der Liste, daß die Zuglaufmeldung zum korrekten Zeitpunkt eingetroffen ist.

Diese halbe Minute wurde für die Testumgebung gewählt, da hier zwischen dem Senden der Zuglaufmeldung und dem Empfang fast kein Zeitverlust auftritt. Auf welchen Wert diese Zeitschranke in Realität gesetzt werden soll, muß entsprechend der eintreffenden Zuglaufmeldungen entschieden werden. Hierbei spielt eine große Rolle, mit welcher Verzögerung die Zuglaufmeldungen in der Betriebszentrale eintreffen, d. h. der Unterschied zwischen dem Zeitstempel der Zuglaufmeldung und dem Zeitpunkt, zu dem die Meldung die Betriebszentrale erreicht.

6.9.4.2 Zuglaufmeldung kommt nicht zum erwarteten Zeitpunkt

Falls die Zuglaufmeldung nicht zum erwarteten Zeitpunkt eintrifft, also die obige Zeitschranke überschritten ist, muß reagiert werden. In diesem Fall ist die Abweichung der beiden Zeiten, nämlich der erwarteten von der berechneten Zuglaufmeldung, größer als eine halbe Minute. Hier wird in ASDIS zunächst ebenfalls vermerkt, daß die Zuglaufmeldung eingetroffen ist, aber es muß auch noch auf die Zuglaufmeldung reagiert werden. Dazu muß dann die in ASDIS berechnete Zeit-Weg-Linie des Zuges entsprechend angepaßt und in der jeweiligen Betriebsstelle verschoben werden.

6.9.4.3 Zuglaufmeldung kommt gar nicht

ASDIS muß nicht nur die eintreffenden Zuglaufmeldungen verarbeiten, sondern auch überprüfen, ob auch alle von ASDIS erwarteten Zuglaufmeldungen eingetroffen sind. Denn es kann auch der Fall auftreten, daß ASDIS eine Zuglaufmeldung erwartet, sie aber zunächst gar nicht kommt. Hier muß ebenfalls eine Zeitschranke verwendet werden, ab der ASDIS reagieren soll. Diese Schranke ist zur Zeit auf eine Minute gesetzt, d. h. wenn eine erwartete Zuglaufmeldung nicht innerhalb einer Minute nach dem Zeitpunkt eintrifft, zu dem ASDIS sie erwartet, wird reagiert. In diesem Fall wird auch die berechnete Zeit-Weg-Linie des Zuges entsprechend der fortgeschrittenen Zeit verschoben.

7 Das Dispositionsverfahren ASDIS/L

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmen wurden als Laborversion (ASDIS/L) implementiert. Da für diese Laborversion noch keine „echten“ Zuglaufmeldungen des realen Betriebsablaufs aus den Systemen der BZ zur Verfügung standen, wurde ein Programm ZLM entwickelt, welches das reale Betriebsgeschehen („Außenwelt“) repräsentieren und ersetzen kann. In diesem Kapitel wird zunächst beschrieben, wie die Kopplung zwischen den beiden Programmen ASDIS/L und ZLM konzipiert und implementiert wurde. Zum Schluß werden beide Programme kurz dargestellt und erläutert.

7.1 Kopplung zwischen ASDIS/L und ZLM

Die Zuglaufmeldungen werden von ASDIS/L benötigt, um die Zugstandorte bestimmen zu können. In der Realität sind diese durch den Haltfall von Signalen ausgelöst und mittels der Zugnummernmeldeanlagen zur Betriebszentrale weitergeleitet worden. Damit die Algorithmen von ASDIS/L unabhängig von einer Anbindung an eine Betriebszentrale getestet werden können, mußte hierzu eine Testumgebung entwikkelt werden. Die Zuglaufmeldungen, die sonst direkt aus den Systemen der Betriebszentrale übernommen würden, müssen nun von einem anderen System erzeugt werden. Dazu wurde das Programm Zuglaufmeldungen (ZLM) erstellt, welches diese Erzeugung übernimmt.

7.1.1 Erzeugung der Zuglaufmeldungen (ZLM)

Das Programm ZLM stellt eine Testumgebung für das Dispositionsverfahren ASDIS/L dar. Die Aufgabe von ZLM besteht darin, die von ASDIS/L neu erzeugten Fahrpläne zu übernehmen und aufgrund dieser die Zuglaufmeldungen zu erzeugen und dann nach ASDIS/L zu übergeben.

In der Realität werden die Zuglaufmeldungen in ihrer zeitlichen Reihenfolge zeitsynchron in Echtzeit übermittelt. Für die Testumgebung ist dies jedoch ungünstig, da man hier ggf. recht lange auf eine Reaktion von ASDIS/L warten müßte. Tritt z. B. die erste zufällig erzeugte Störung erst nach 20 Minuten auf, so müßte man diese 20 Minuten in Echtzeit verstreichen lassen, ohne daß bis dahin eine Reaktion von ASDIS/L erfolgt. Daher wurde für die Testumgebung eine asynchrone Kopplung zwischen den Programmen ASDIS/L und ZLM gewählt. Diese Kopplung geschieht ereignisorientiert, der Algorithmus in ASDIS/L schreitet dann in Folge dieser Ereignisse fort.

Hierzu wurde eine Ereigniswarteschlange geschaffen, auf die sowohl von ASDIS/L als auch von ZLM zugegriffen werden kann. Jede Zuglaufmeldung stellt dabei ein Ereignis dar und wird von ZLM mit dem entsprechenden Zeitstempel der Zuglaufmeldung in die Ereigniswarteschlange eingetragen. Da ASDIS/L auch reagieren muß, wenn eine Zuglaufmeldung nicht rechtzeitig eintrifft (siehe Abschnitt 6.9.4.3), werden zusätzliche, sogenannte Weckruf-Ereignisse von ASDIS/L erzeugt. Diese Weckruf-Ereignisse stellt ASDIS/L in die Ereigniswarteschlange genau zu dem Zeitpunkt, wenn ASDIS/L auf eine nicht eintreffende Zuglaufmeldung reagieren würde. Der Zeitstempel ist also hierbei die Summe aus der nächsten von ASDIS/L erwarteten Zuglaufmeldung plus der in Abschnitt 6.9.4.3 genannten Zeitschranke. In der Ereigniswarteschlange stehen nun neben den nächsten Zuglaufmeldungen (von ZLM erzeugt) auch immer ein Weckrufereignis (von ASDIS/L erzeugt). In Abb. 34 ist die Prozeßkommunikation zwischen den beiden Prozessen ASDIS/L und ZLM graphisch dargestellt.

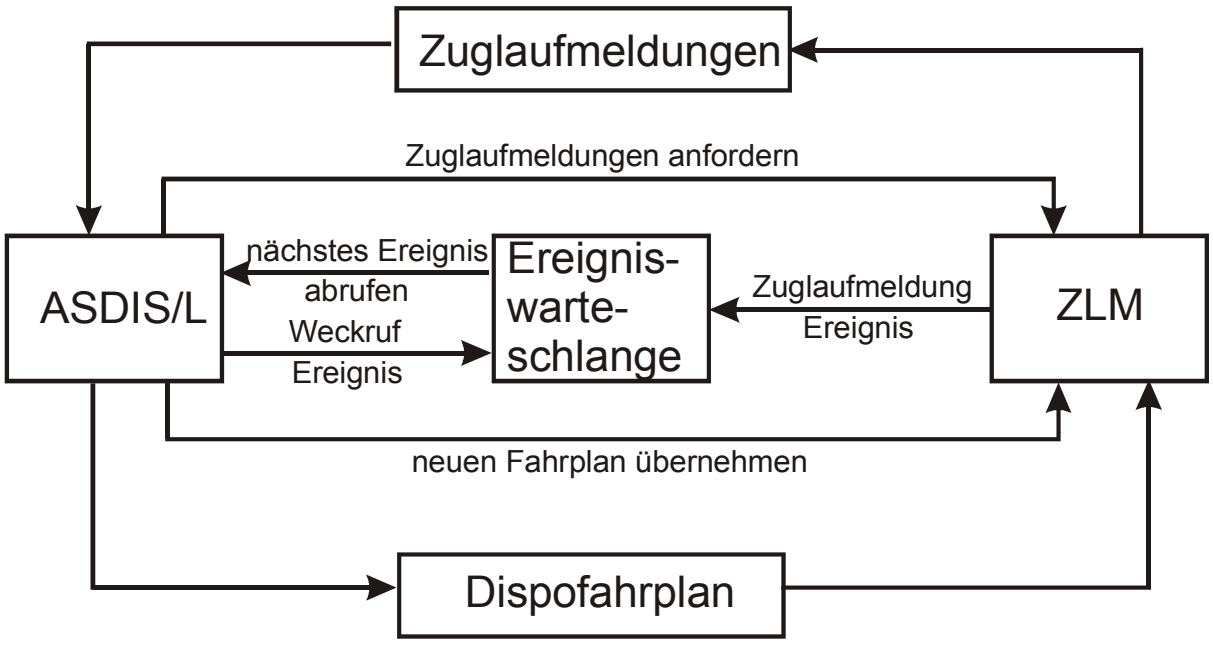

Abb. 34: Ereignisorientierte Prozeßkommunikation

ASDIS/L ist immer der aktive Prozeß, welcher zu gegebener Zeit ZLM anstößt, eine Aktion auszuführen. Der Algorithmus ist in einem Ablaufdiagramm in Abb. 35 dargestellt. Die Aufforderungen von ASDIS/L an ZLM, eine Aktion auszuführen, sind hierin besonders vermerkt.

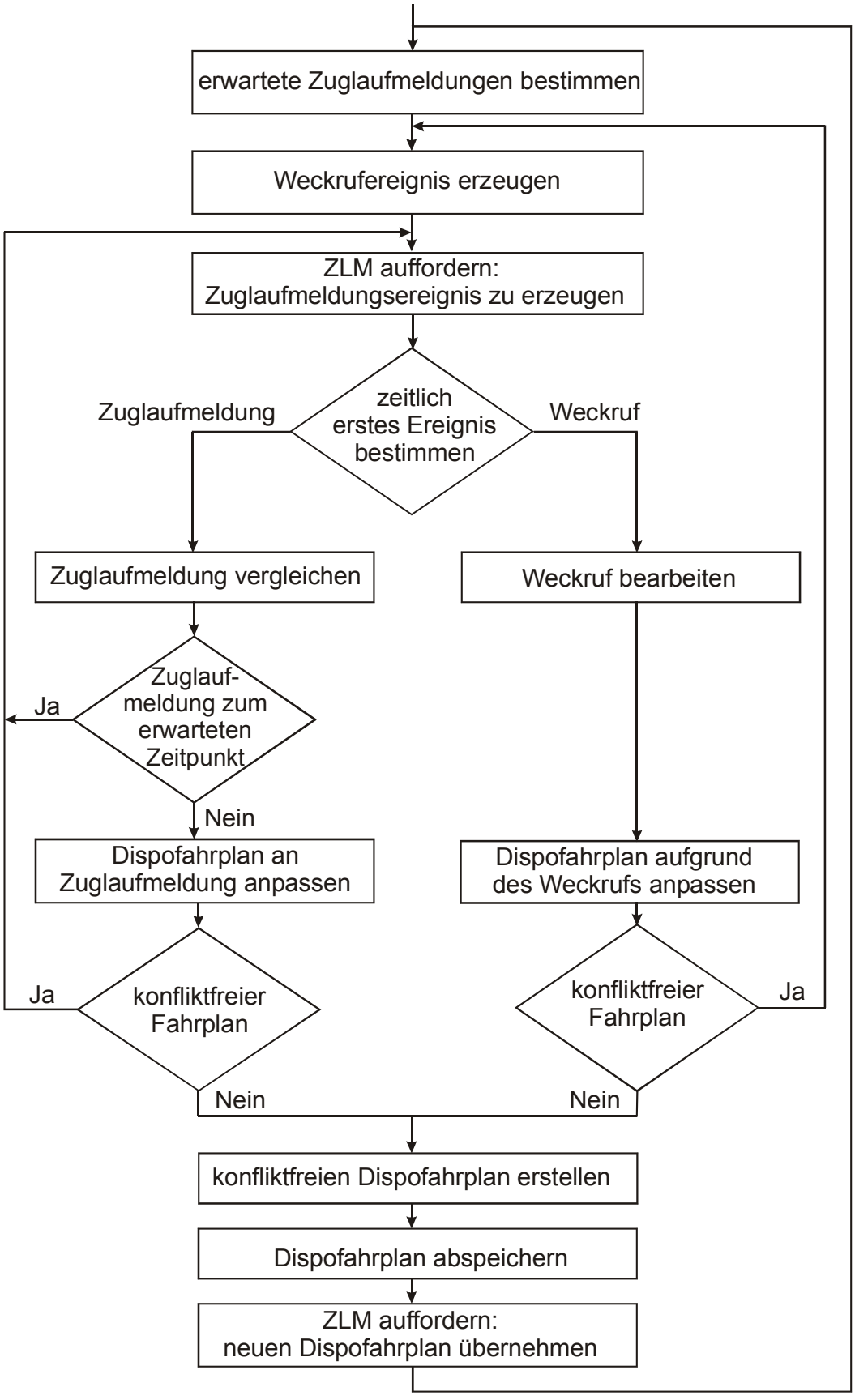

Abb. 35: Ablaufdiagramm

Nach der Bestimmung der zu erwartenden Zuglaufmeldungen kann ASDIS/L die davon zeitlich erste ermitteln und ein entsprechendes Weckrufereignis in die Ereigniswarteschlage stellen. Danach wird ZLM aufgefordert, Zuglaufmeldungen zu erzeugen und die jeweiligen Ereignisse in die Ereigniswarteschlange zu schreiben. ASDIS/L wertet diese Ereigniswarteschlange aus, indem ASDIS/L das zeitlich erste Ereignis aus dieser Warteschlange entnimmt.

Handelt es sich hierbei um eine Zuglaufmeldung, so wird der Zeitstempel der Meldung mit dem in ASDIS/L berechneten Zeitpunkt verglichen. Sind beide Zeiten identisch, so geschieht ein Rücksprung zur Aufforderung an ZLM, neue Zuglaufmeldungen zu erzeugen. Im anderen Fall wird der Dispositionsfahrplan entsprechend des Zeitstempels der Zuglaufmeldung angepaßt und – falls Konflikte in diesem Fahrplan enthalten sind – ein neuer, konfliktfreier Dispositionsfahrplan erstellt. Dieser Dispositionsfahrplan wird gespeichert und ZLM aufgefordert, diesen neuen Fahrplan zu übernehmen. Anschließend werden alle Ereignisse gelöscht, und es erfolgt ein Rücksprung zum Anfang.

Falls das erste Ereignis der Warteschlange ein Weckrufereignis ist, so wird der Dispositionsfahrplan an diesen Weckruf angepaßt. Sind nun keine Konflikte entstanden, so erzeugt ASDIS/L ein neues Weckrufereignis. Ansonsten wird ein neuer konfliktfreier Dispositionsfahrplan erstellt und so verfahren wie oben.

Zum Testen der Kommunikationsschnittstelle müssen die Zuglaufmeldungen von ZLM in geeigneter Form nach ASDIS/L übertragen werden. Hierzu wurde eine Dateischnittstelle ausgewählt. Die Zuglaufmeldungen werden von ZLM zu den entsprechenden Zeitpunkten in einzelne Dateien geschrieben. ASDIS/L überprüft in regelmäßigen Abständen, ob hier eine neue Datei von ZLM geschrieben worden ist, liest diese Datei und verarbeitet ihren Inhalt (siehe Abschnitt 6.9.4). Damit die Zuglaufmeldungen an ASDIS/L zum richtigen Zeitpunkt übermittelt werden können, müssen sie zuvor bestimmt und in einer Datenstruktur abgelegt werden. In dieser Datenstruktur sind alle Zuglaufmeldungen abgespeichert und nach ihrem Zeitpunkt sortiert. Die Zuglaufmeldung, die als erstes gesendet werden muß, steht am Anfang der Liste, die letzte am Ende der Liste. Weiterhin sind als Daten in dieser Liste neben dem Zeitpunkt auch die Zugnummer und die Signalbezeichnung (inklusive der Betriebsstellenbezeichnung) enthalten, so daß die Zuglaufmeldungen eindeutig zugeordnet werden können.

Für die Weiterschaltung der Zuglaufmeldungen in der Realität dient der Haltfall des Signals. Da jedoch der Zeitpunkt des Signalhaltfalls je nach Signal variiert, wurde für die Testumgebung der Zeitpunkt gewählt, wenn die Zugspitze den Signalstandort er-

reicht hat. Die so gewählte Lösung ist für die Testumgebung exakt und die Abweichung zur Realität hinreichend klein.

Die Zuglaufmeldungen werden jeweils bei der Fahrzeitrechnung gespeichert, wenn man im Laufe der Rechnung auf ein Hauptsignal trifft. Diese dann für jeden Zug ermittelten Zuglaufmeldungen müssen in die Liste nach Zeitpunkten sortiert eingetragen werden. Damit dies schon während der Fahrzeitrechnung geschehen kann, sind auch hier entsprechende Erweiterungen und Ergänzungen in der Fahrzeit- und Belegungsrechnung erforderlich.

Bevor die Fahrzeitrechnung in ZLM angestoßen wird, müssen die zufälligen Verspätungen der Züge eingespielt werden. Hierzu werden entsprechende Verspätungsverteilungen, getrennt nach Einbruchs- und Unterwegsverspätungen, für die unterschiedlichen Zuggattungen in ZLM vorgegeben. Wie in der Eisenbahnbetriebswissenschaft üblich, werden negativ exponential verteilte Verspätungen angenommen und durch zwei Parametern (Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Verspätung und Mittelwert der verspäteten Züge) charakterisiert. Per Zufallsgenerator werden dann die Verspätungen erzeugt.

7.2 Das Programm ASDIS/L

Nach dem Programmstart von ASDIS/L erscheint ein Informationsfenster, in dem unter anderem auch die aktuelle Versionsnummer von ASDIS/L zu entnehmen ist. Zuerst wird der Benutzer aufgefordert, ein Projekt zu öffnen. Dies geschieht durch Auswahl eines Dateinamens in dem Dialogfenster.

Im Anschluß befindet man sich im Hauptfenster von ASDIS/L (siehe Abb. 36). In einem Unterfenster stehen die berechneten Zuglaufmeldungen, die ASDIS/L nun erwartet. Falls ASDIS/L im späteren Verlauf des Programms schon Zuglaufmeldungen verarbeitet hat, so wird in diesem Fenster angezeigt, wann die entsprechende Zuglaufmeldung eingetroffen ist. Die Info-Meldung „Nächstes Ereignis Nr. n“ gibt an, daß ASDIS/L darauf wartet, das Ereignis Nr. n abzurufen. Nachdem der Anwender „ok“ gewählt hat, wird die Ausführung des Programms fortgesetzt. An dieser Stelle wartet ASDIS/L immer auf die Aktion des Benutzers, damit er auch noch weitere Fenster ansehen kann.

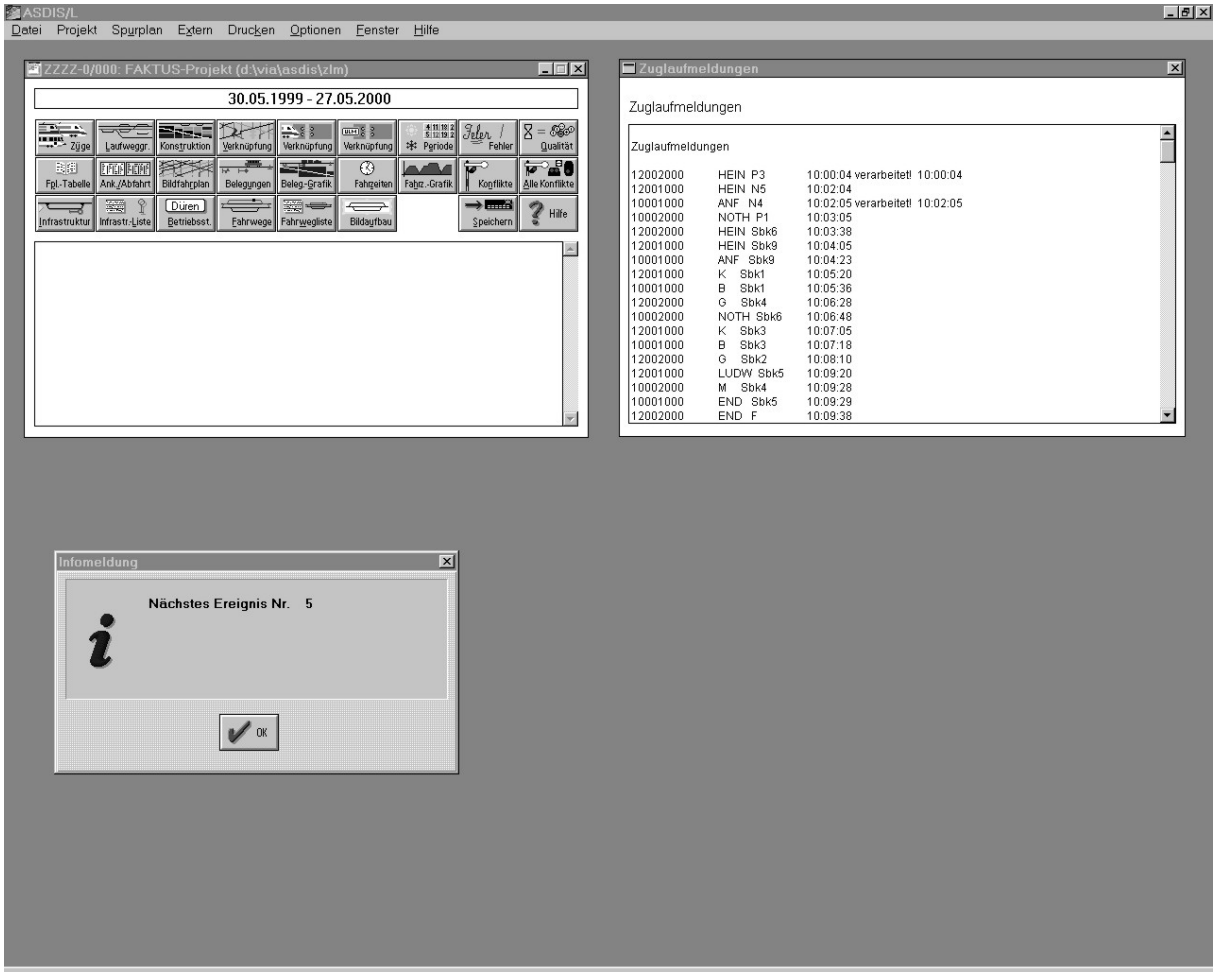

Abb. 36: Hauptfenster ASDIS/L

Im Menü „Optionen“ gibt es den Menüpunkt „ASDIS-Parameter“, mit dem man die zugrundeliegenden Parameter einsehen und ändern kann. Diese Parameter beeinflussen die Konfliktlösung von ASDIS/L. Damit die Werte später rekonstruiert werden können, ist es möglich, sie zu speichern und wieder zu laden. Dabei werden die Werte in die Datei „ASDIS.INI“ gespeichert, die im gleichen Verzeichnis wie die Fahrplandaten steht. Die Vorbelegungen der einzelnen Werte sind der Abb. 37 zu entnehmen.

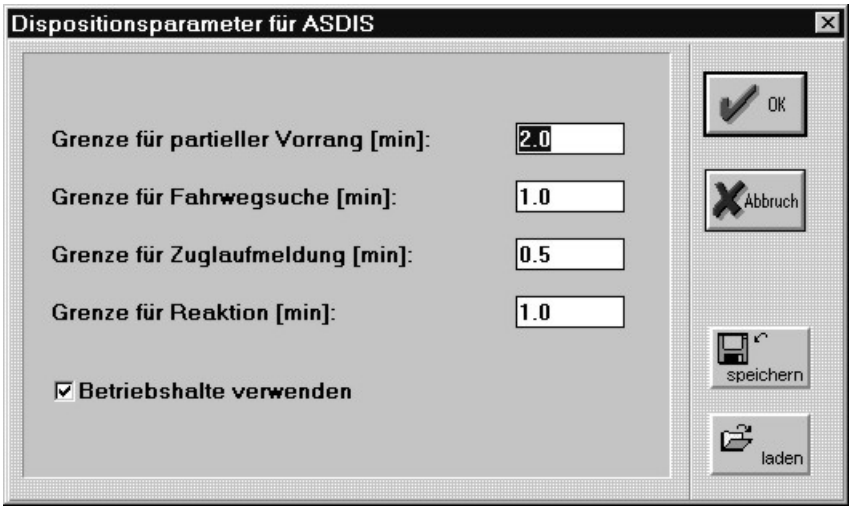

Abb. 37: ASDIS-Parameter

Die einzelnen Werte entsprechen den Parametern, die oben beschrieben wurden, und werden hier nur kurz erläutert:

- Grenze für partiellen Vorrang: bis zu diesem Schwellenwert wird ein partieller Vorrang getestet und realisiert
- Grenze für Fahrwegsuche: liegt die Haltezeitverlängerung unterhalb dieser Schwelle, werden keine alternativen Fahrwege gesucht
- Grenze für Zuglaufmeldung: bis zu diesem Schwellenwert wird die Zuglaufmeldung als korrekt interpretiert
- Grenze für Reaktion: ab diesem Schwellenwert wird eine Reaktion von ASDIS angestoßen (mit diesem Wert wird auch das Weckrufereignis bestimmt)
- Betriebshalte verwenden: gibt an, ob Betriebshalte verwendet werden sollen oder nicht

Der Dispositionsfahrplan kann in einem Fenster mit den Sperrzeitentreppen angezeigt werden (siehe Abb. 38). Aus diesem Dispositionsfahrplan werden die Zuglaufmeldungen, die ASDIS/L erwartet, bestimmt. Ebenso sind hier die Soll-Zeit-Weg-Linien der Züge eingetragen, so daß der Anwender einen direkten Soll-Ist-Vergleich durchführen kann.

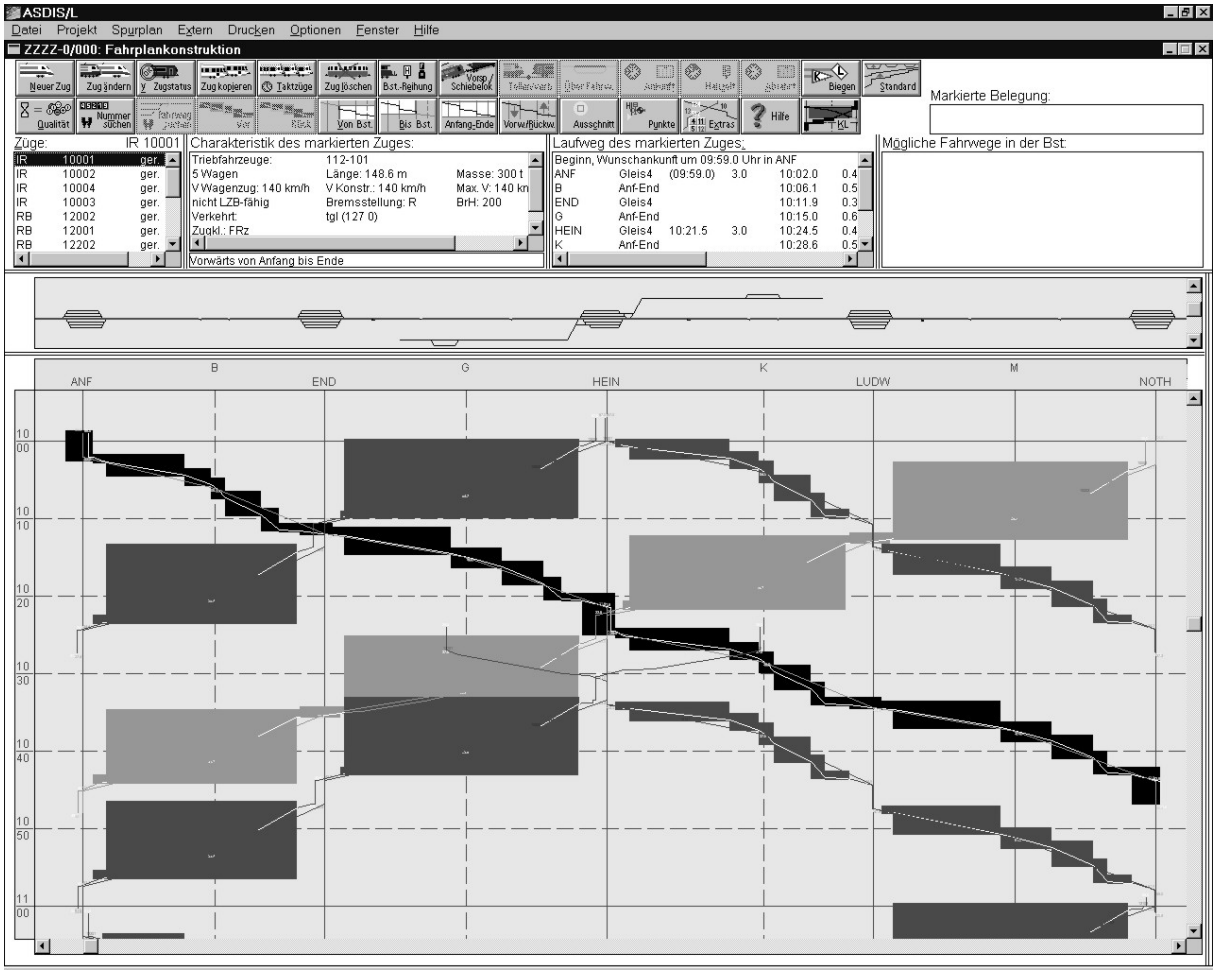

Abb. 38: Sperrzeitentreppen des Dispositionsfahrplans

Die Dispositionsmaßnahmen der Konfliktlösungen werden, nachdem ASDIS/L eine Konfliktlösung gefunden hat, in einem Fenster angezeigt (siehe Abb. 39). Zusätzlich kann der Anwender auch die Konfliktlösung anhand der Zeit-Weg-Linien und Sperrzeitentreppen nachvollziehen (siehe Abb. 40). Die waagerechte rote Linie kennzeichnet hierbei die aktuelle Zeit; der Bereich oberhalb dieser roten Linie stellt die Vergangenheit dar, der untere Bereich die Zukunft. Den Bildschirmausschnitt kann der Benutzer selbst festlegen, um damit das Verhältnis von Vergangenheits- und Zukunftsbereich zu bestimmen.

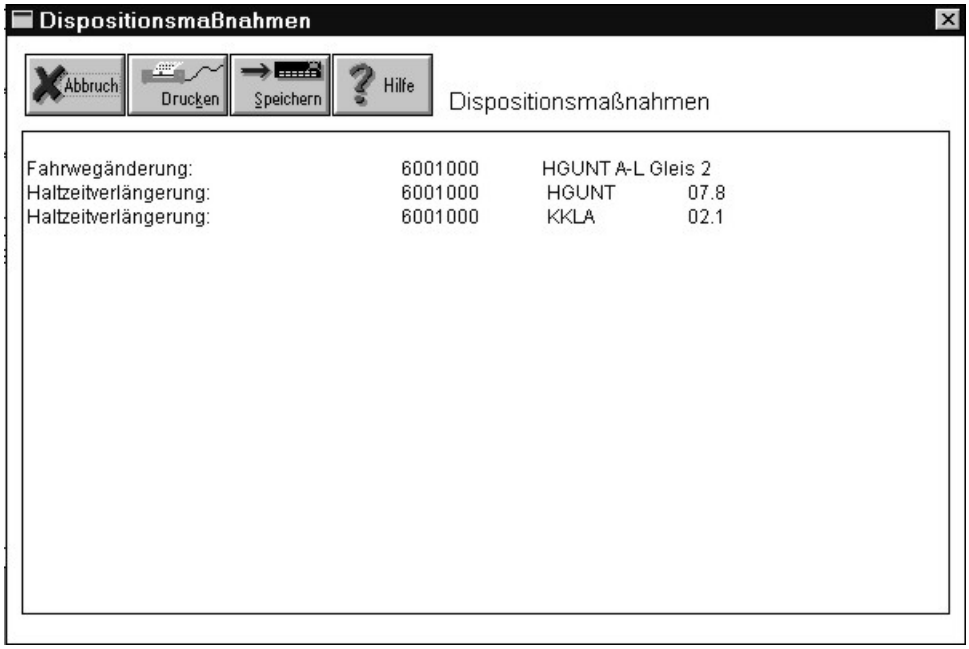

Abb. 39: Dispositionsmaßnahmen einer Konfliktlösung

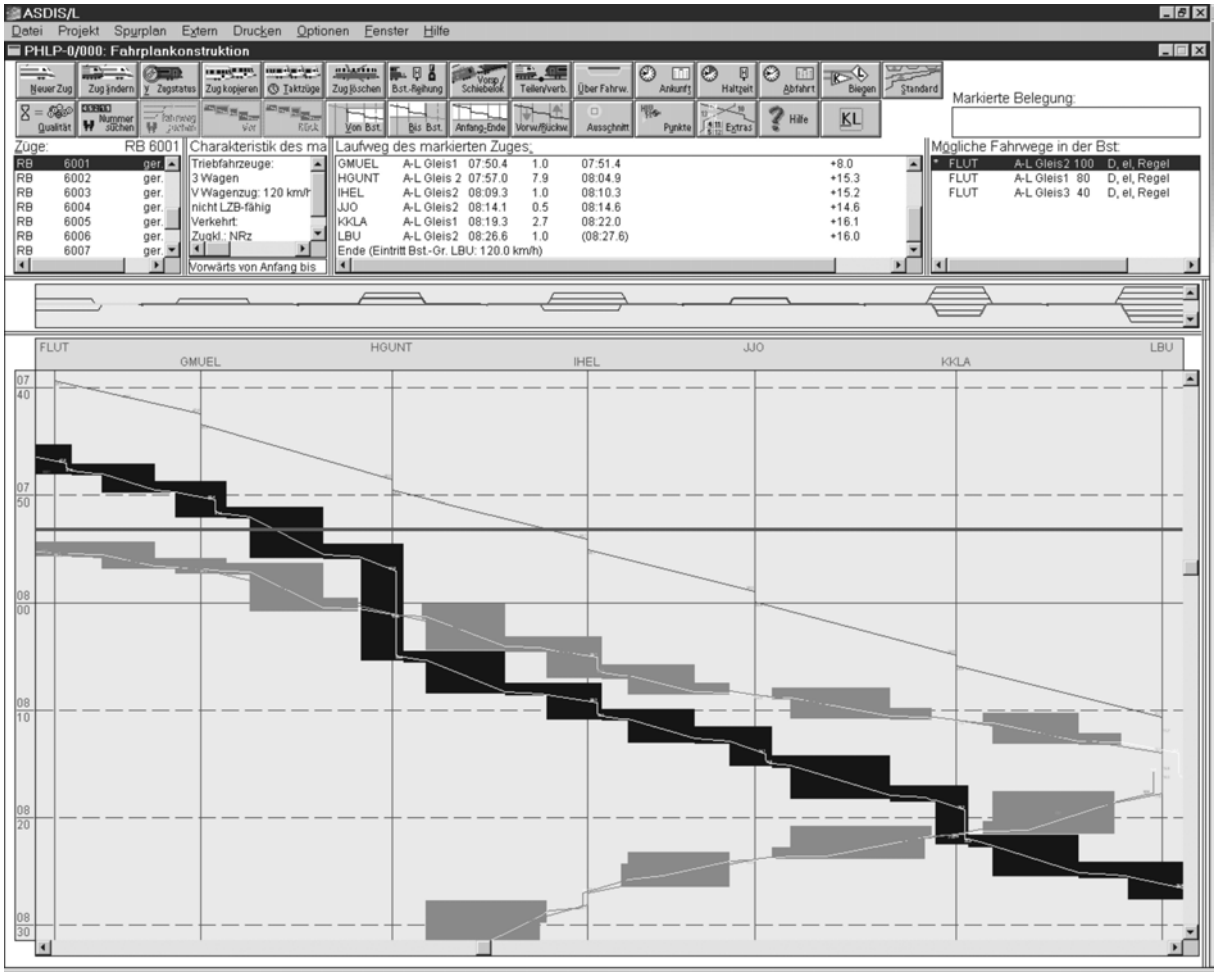

Abb. 40: Konfliktlösung mit Sperrzeitentreppen

7.3 Das Programm ZLM

In einem Informationsfenster wird die aktuelle Versionsnummer des Programms ZLM angezeigt, bevor der Benutzer aufgefordert wird ein Projekt zu öffnen. Nach Auswahl der zu öffnenden Dateien kann der Benutzer im Parameter-Fenster (siehe Abb. 41) die zugrundeliegenden Parameter einsehen und ändern. Diese Parameter beeinflussen die Generierung von Störungen in ZLM. Damit die Werte später rekonstruiert werden können, ist es möglich, sie zu speichern und wieder zu laden. Dabei werden die Werte in die Datei „ZLM.INI“ gespeichert, die im gleichen Verzeichnis wie die Fahrplandaten steht.

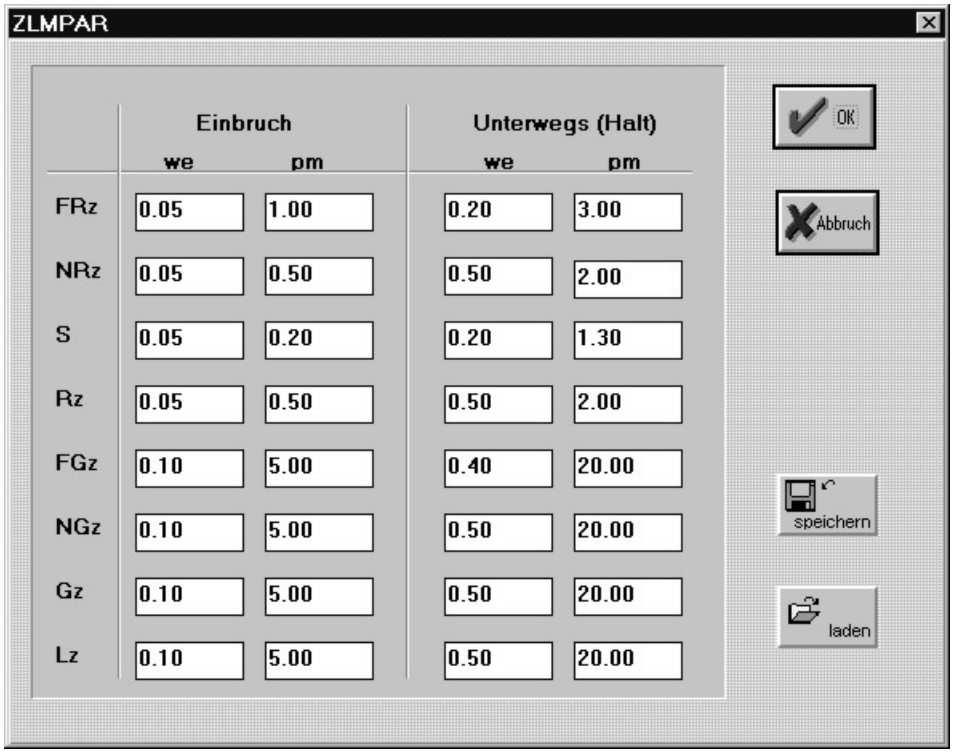

Abb. 41: ZLM-Parameter

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Verspätungen werden nach Zuggattungen getrennt angegeben. Die Zuggattungen Fernreisezug (FRz) bis Lokzug (Lz) entsprechen denen bei der Fahrplankonstruktion. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden wie üblich negativ exponential mit den Parametern we (Wahrscheinlichkeit einer Verspätung) und pm (mittlere Verspätung) angegeben. Für die eingegebenen Werte muß gelten: $0 \leq we \leq 1$ und $pm \geq 0$. Sie können für Urverspätungen als Haltezeitverlängerung und als Einbruchsverspätung im Untersuchungsbereich getrennt festgelegt werden. Die Vorbelegungen sind der Abb. 41 zu entnehmen und entsprechen denen der R 405 [23] der DB Netz AG.

Im Anschluß befindet man sich im Hauptfenster von ZLM (siehe Abb. 42). In einem untergeordneten Fenster werden die anhand der ZLM-Parameter zufällig erzeugten Störungen angezeigt. In einem weiteren Fenster stehen die berechneten Zuglaufmeldungen, die ZLM nach Aufforderung von ASDIS/L erzeugt.

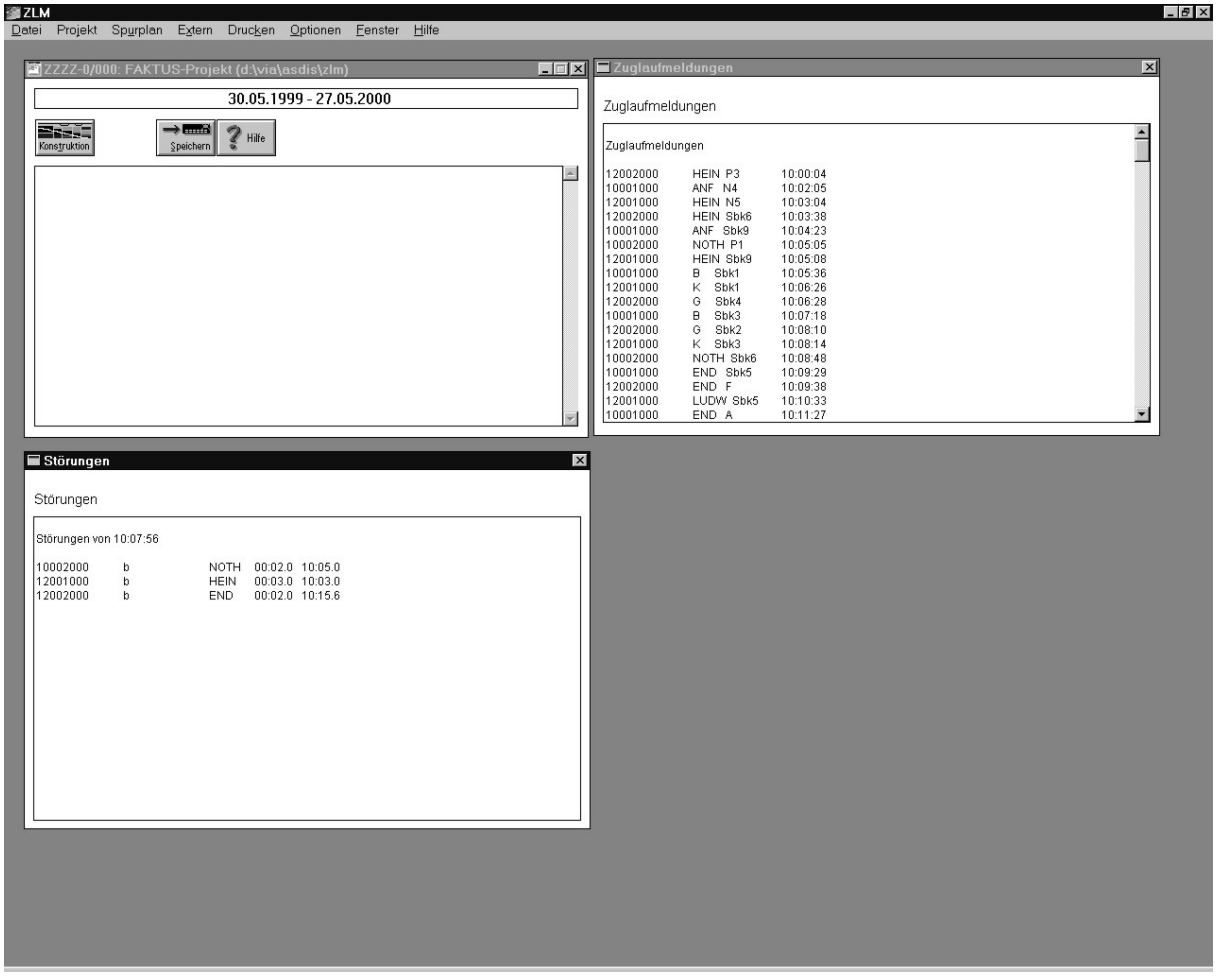

Abb. 42: Hauptfenster ZLM

7.4 Anwendungsmöglichkeiten

Das Verfahren ASDIS zur Asynchronen Disposition ist dazu konzipiert, eine Konfliktermittlung und eine Konfliktlösung in größeren Teilnetzen zu realisieren. Damit ist es möglich, ASDIS in den neuen Betriebszentralen der DB Netz AG einzusetzen.

Durch die erfolgte Implementierung in einer Laborversion konnten die in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen gestestet und verbessert werden. Die Laborversion des Verfahrens ASDIS/L hat gezeigt, daß die Anwendung nicht nur auf einzelne Strecken begrenzt ist, sondern daß auch Teilnetze mit größeren Knotenbahnhöfen disponiert werden können. Bei der Entwicklung der Laborversion wurde auf die Datenstrukturen und die Implementation von FAKTUS/RUT-0 zurückgegriffen. Die hieraus resultie-

renden Beschränkungen wurden für die Entwicklung der Laborversion in Kauf genommen. Diese Einschränkungen sind eine Folge der verwendeten 16 Bit Entwicklungsumgebung, die bezogen auf Rechenzeit und Speicherplatz nicht mehr dem heutigen Stand der Technik entspricht.

Aus diesem Grund konnte auch die Netzgröße nicht beliebig erweitert werden. Für einen Einsatz in den Betriebszentralen der DB Netz AG gelten erhöhte Anforderungen an ein Dispositionssystem, so daß hier aus der Laborversion eine anwendungsreife Version neu entwickelt werden muß.

Diese Einschränkungen gelten jedoch nur für die im Rahmen dieser Arbeit implementierte Laborversion und nicht für das zugrunde liegende Verfahren ASDIS. Dies betrifft die hier entwickelten Algorithmen jedoch nicht. Sie sind auch in größeren Netzteilen einsetzbar.

Für einen Einsatz in den Betriebszentralen der DB Netz AG können die entwickelten Algorithmen sowohl einzelne Konfliktlösungsvorschläge unterbreiten als auch komplett einen neuen Dispositionsfahrplan erstellen. ASDIS kann beispielsweise in einer ersten Phase den Disponenten bei seinen Entscheidungen unterstützen. Hierbei würde dann ASDIS die Konflikte automatisch erkennen und beispielsweise mehrere Konfliktlösungsvorschläge dem Disponenten unterbreiten. Der Disponent kann diesen Vorschlag direkt umsetzen oder aber auch eigene Lösungen interaktiv realisieren, die dann wiederum vom System umgesetzt werden. Eine Eingriffsmöglichkeit des Disponenten ist die Veränderung der Prioritäten der Züge. Durch entsprechende Hierarchiefestlegungen kann er die Konfliktlösung unmittelbar beeinflussen.

In einer anschließenden Phase könnte dann ASDIS in vielen Standardfällen systemintern eine Entscheidung treffen. Dann würde ASDIS automatisch einen neuen konfliktfreien Fahrplan erstellen, sobald sich die Rahmenbedingungen verändern. Dies wäre dann der Schritt zur automatischen Betriebsabwicklung, bei der der Disponent nur noch überwachende Aufgaben besitzt und in das System nur noch in den Situationen eingreift, wenn er weitergehende Informationen besitzt, die in ASDIS nicht vorliegen.

Beispiele für notwendige Eingriffsmöglichkeiten des Disponenten bei einer automatischen Erstellung der Dispositionsfahrpläne sind:

- Einlegen von ad-hoc Sonderzügen
- Einsatz von Ersatzzügen für stark verspätete Züge
- Änderung der Hierarchiestufen der Züge
- Kürzung des Zuglaufs bei großen Verspätungen
- Vorgabe welche Anschlüsse aufgegeben werden können und welche nicht

Neben diesen aufgeführten Punkten können auch je nach Betriebssituation noch weitere Punkte hinzu kommen, die durch eine automatische Dispositionsfahrplanerstellung nicht berücksichtigt werden können, weil die hierzu notwendigen Daten nicht elektronisch verfügbar sind.

7.5 Visionen für die Zukunft

Mit einer zukünftigen Einführung von ASDIS in die Betriebszentralen der DB Netz AG muß jedoch die Entwicklung von ASDIS noch nicht abgeschlossen sein. So können z. B. bei der Ortungsgenauigkeit der Züge im Netz noch Fortschritte gemacht werden. Auch ist denkbar, daß man auf die operationelle Ebene der Stellwerke verzichten kann und dann die Sicherheitsverantwortung von der Stellebene in die Dispositionsebene verlegt. Mit dem Verfahren ASDIS wäre dies durchaus möglich, da die Belegungen der Züge bekannt sind. Hierzu ist natürlich analog zu einem Elektronischen Stellwerk ein entsprechender Sicherheitsnachweis zu erbringen.

7.5.1 Genauere Ortung

Aufgrund der zur Zeit verwendeten Signal- und Sicherungstechnik ist es zunächst nur möglich die Zuglaufmeldungen über die Zugnummernmeldeanlage zu bestimmen. Hier wird jeweils ein Telegramm bei Haltfall des betreffenden Signals ausgelöst, welches in den Stellwerken zur Weiterschaltung der Zugnummer in nächste Feld dient. Der Haltfall wird bei Relais- oder Elektronischen Stellwerken bei Besetztmelden oder Freimelden einer Weiche oder eines Gleisabschnitts erzeugt. Dies können bei verschiedenen Fahrwegen in einem Stellwerk auch verschiedene Gleiselemente sein. Daher ist es erforderlich, nicht nur das Signal anzugeben, welches die Haltfallmeldung erzeugt, sondern den Infrastrukturpunkt anzugeben, an dem diese Haltfallmeldung für die Zugnummernmeldeanlage erzeugt wird. Nur so ist es möglich, den Zug mit einer hohen Genauigkeit zu orten.

Wünschenswert für die Zukunft wäre, daß die Züge genauer und häufiger geortet werden können und nicht nur beim Signalhaltfall eine Positionsmeldung erfolgt. Dies ist aber nur dann realisierbar, wenn die Fahrzeuge und Strecken mit GSM-R ausgerüstet sind, und so per Funk eine Standortmeldung der Züge angefordert werden kann. Um die Anzahl der erforderlichen Standortmeldungen zu reduzieren, ist auch denkbar, dem Triebfahrzeug per Funk die für ihn disponierte Zeit-Weg-Linie zu übermitteln. Das Triebfahrzeug kann dann die Position anhand der übermittelten Zeit-Weg-Linie ermitteln und mit seiner aktuellen Position, die mit Hilfe von Balisen und Radumdrehungsmessung (evtl. zusätzlich Dopplerradar) berechnet wird, vergleichen. ASDIS benötigt eine Zuglaufmeldung des Zuges nur dann, wenn die Soll-Position von der Ist-Position des Zuges abweicht. Nur in diesem Fall ist es erforderlich, daß der Zug eine Standortmeldung per Funk an ASDIS liefert. Im anderen Fall, wenn die aktuelle Position der berechneten entspricht, kann eine Standortmeldung unterbleiben, so daß sich der Zug nur im „Störungsfall“ bei ASDIS mit einer neuen Position meldet. Hierdurch kann der Funkkommunikationsaufwand auf ein Minimum beschränkt werden und ASDIS hat trotzdem immer die aktuellen Standorte aller Züge.

7.5.2 Verzicht auf die operationelle Ebene der Stellwerke

In Zukunft ist es auch möglich, mit Hilfe von Dispositionssystemen den Eisenbahnbetrieb sicher abzuwickeln und auf die Stellwerke zu verzichten. Die Sicherheitsverantwortung liegt dann bei dem Dispositionssystem. Daher ist es ein Ziel, die Asynchrone Disposition (ASDIS) zur unmittelbaren Steuerung der Fahrzeuge und Stelleinrichtungen zu verwenden. Die in ASDIS abgespeicherten Sperrzeitentreppen verwendet man, um die Zeiten zu bestimmen, zu denen die Fahrwegbildung (z. B. Weichenumstellung, …) angestoßen werden muß. Dann ist es möglich, auf die bisherige operationelle Ebene in Form von besetzten Stellwerken zu verzichten.

Die präzise Abbildung der Infrastruktur im SPURPLAN-Graphen einschließlich aller sicherheitsrelevanten Angaben legt es nahe, diesen Graphen unmittelbar als Quelle der Fahrstraßenlogik zu verwenden. In FAKTUS werden schon alle Belegungskonflikte z. B. infolge von Fahrstraßenausschlüssen oder Durchrutschwegbelegungen angezeigt, in ASDIS werden diese Konflikte dann automatisch gelöst. Die geplanten Zugtrassen sind in der Zugdatei als Sollwerte festgehalten. Die Züge werden dann in ASDIS in einen Dispositionsfahrplan hierarchisch eingelegt. Diese automatische Fahrplanbearbeitung wird in kurzen Abständen wiederholt, wenn signifikante Abweichungen festgestellt werden. Ergeben sich hierbei Konflikte, so werden andere Fahrwege gesucht, Halte verlängert oder zusätzliche Betriebshalte eingefügt, um die

entstandenen Konflikte zu lösen. Am Ende der automatischen Fahrplanbearbeitung liegt ein konfliktfreier Fahrplan vor, der dann als Dispositionsfahrplan umgesetzt wird.

In ASDIS sind die Sperrzeitentreppen aller Züge berechnet worden. Am Beginn der Sperrzeit steht die „Fahrstraßenbildezeit“. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt die ggf. erforderliche Umstellung der Weichen, die dann am Ende der Fahrstraßenbildezeit abgeschlossen ist. Aufgrund des SPURPLAN-Graphen ist in ASDIS bekannt, welche Stellungen die Weichen für die vorhandenen Fahrstraßen einnehmen müssen. Die Weichen erhalten ihre Umstellbefehle (Weichenlage rechts oder links) per Funk (z. B. über die digitalen GSM-R-Netze) unmittelbar von dem Dispositionsrechner. Umgekehrt empfängt der Rechner Statusmeldungen der Weichen (Weiche hat Endlage erreicht oder nicht erreicht). Erst nach dieser Rückmeldung kann der Dispositionsrechner diese Weiche für die Zugfahrt freigeben. Falls man zusätzliche Weichenisolierungen verwendet, kann die Steuerung der Weiche feststellen, ob sie frei ist oder nicht und nur im freien Zustand Umstellbefehle akzeptieren.

Die erstellten konfliktfreien Fahrpläne müssen zur Durchführung des Betriebes den einzelnen Fahrzeugen in Form von Fahrbefehlen übermittelt werden. An der Strecke braucht hierfür keine ortsfeste Signalisierung, die hohe Kosten verursacht, vorhanden zu sein. Vor jedem Gefahrenpunkt wird eine Blockmarkierung analog zu den LZB-Tafeln gesetzt. Gefahrenpunkte sind z. B. Weichen oder auch Bahnübergänge. Diese Blockmarkierungen stellen gemäß fail-safe zunächst Haltbefehle dar, so daß das Triebfahrzeug vor einer solchen Blockmarkierung anhalten muß. Diese Halte müssen von dem Dispositionssystem jeweils mittels Fahrbefehlen aufgehoben werden. Diese Fahrbefehle enthalten einen solchen Bremszielpunkt, eine Zielgeschwindigkeit sowie eine Sollgeschwindigkeit. Auch die Fahrbefehle können per Funk von dem Dispositionsrechner an das Fahrzeug übermittelt werden.

Hierbei würde ASDIS die volle Sicherheitsverantwortung übernehmen. Dies ist nur dann möglich, wenn die Infrastrukturdatenbank SPURPLAN hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Daten signaltechnisch sicher ist und die Zugintegrität zugintern sichergestellt werden kann. Ein Umstellen der Weiche unter dem Zug kann zusätzlich durch Weichenisolierungen ausgeschlossen werden. Zugschlußstellen und Signalstandorte werden dann nur noch im Rechner virtuell abgebildet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein neuer Ansatz für die Dispositionsüberstützung bei der Betriebsabwicklung von Eisenbahnen entwickelt. Der Einsatz von Methoden des rechnerunterstützten Trassenmanagements und Anwendung des asynchronen Ansatzes führen zu einem neuen Dispositionsverfahren ASDIS, welches in den Betriebszentralen der Eisenbahninfrastrukturbetreiber eingesetzt werden kann.

Ein erster Schritt zur einer Verbesserung der Situation wurde durch die Einführung der rechnerunterstützten Zugüberwachung erzielt. Jedoch gab es bislang keine größeren Erweiterungen, um die Nachteile auszumerzen. Mit einer Parallelverschiebung der Zeit-Weg-Linien in Verspätungsfall und ohne Betrachtung der Sperrzeitentreppen kann keine exakte Konflikterkennung erfolgen, die eine Grundvoraussetzung für qualitativ gute Konfliktlösungen ist. Erst durch das Konzept der Betriebszentralen, die auf eine integrierte Fahrzeitrechnung und auch die Möglichkeiten der Berechnung der Sperrzeitentreppen zurückgreift, kann eine Verbesserung der Situation in der Betriebsdurchführung erzielt werden.

An dieser Stelle ist auch der Ansatzpunkt des in dieser Arbeit neu konzipierten Verfahrens zur Asynchronen Disposition ASDIS, mit dessen Hilfe konfliktfreie Dispositionsfahrpläne erstellt werden können. Diese Dispositionsfahrpläne beruhen auf den Gegebenheiten des aktuellen Betriebsgeschehens. Bei jeder Abweichung vom derzeit aktuellen Dispositionsfahrplans wird, falls aus den Abweichungen Konflikte entstehen, ein neuer Dispositionsfahrplan konstruiert. Auf Grund einer exakten Fahrzeitrechnung, die auch das Kürzen der Fahrzeitzuschläge im Verspätungsfall beinhaltet, kann eine genaue Prognose für die weiteren Fahrtverläufe der Züge erstellt werden. Mit Hilfe der asynchronen Vorgehensweise können Konflikte erkannt und gelöst werden, die erst in weiterer Zukunft auftreten werden. Dadurch kann eine weiträumige Disposition realisiert werden.

Durch den Einsatz von ASDIS in den Betriebszentralen kann eine durchgängige Linie von der Planung bis zum operativen Geschäft erreicht werden. Im Trassenmanagement ist die rechnerunterstützte Fahrplankonstruktion mit FAKTUS/RUT-0 bereits seit Jahren Standard. Für eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen stehen sowohl analytische Verfahren (ANKE) als auch Simulationswerkzeuge (BABSI) zur Verfügung, mit denen Leistungsuntersuchungen bzw. Fahrplanstabilitätsuntersuchungen durchgeführt werden können. Am Schluß dieser Kette steht ASDIS, mit dem eine rechnerunterstützte Betriebsführung oder sogar eine automatische Betriebsführung möglich ist. Da alle Verfahren auf den gleichen Grundlagen (dem SPURPLAN-

Infrastrukturgraph, der Fahrzeit- und Belegungsrechnung sowie der Sperrzeitentreppe) aufbauen, ist gewährleistet, daß größtmögliche Kompatibilität erzielt werden kann. Dies betrifft zum einen den Datenaustausch (Infrastruktur als auch Fahrplandaten) und zum anderen den mit der gleichen Fahrzeit- und Belegungsrechnung ermittelten Sperrzeitentreppen, so daß beispielsweise ein im Trassenmanagement konstruierten konfliktfreier Fahrplan auch nach der Übernahme in der Betriebsdisposition konfliktfrei ist. Diese für eine verbesserte Qualität der Betriebsführung wünschenswerte Kompatibilität ist heute aufgrund von unterschiedlichen historischen Entwicklungen noch nicht realisiert [105].

Das neu entwickelte Verfahren ASDIS ist bereits konzeptionell so angelegt, daß ein Einsatz in den neu eingerichteten Betriebszentralen der DB Netz AG möglich ist [48]. Die Schnittstellen hierfür sind bereits definiert [96] und stehen für einen Einsatz in den BZ bereit. Mit ASDIS können die Disponenten in der BZ von Routinearbeit entlastet werden. Durch die Einführung von ASDIS kann eine weitergehende Automation für eine Verbesserung von Produktivität, Qualität und Flexibilität in der Betriebsführung erreicht werden.

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bildfahrplanblatt 18
Abb. 2: Bahnhofsfahrordnung (aus [102]) 19
Abb. 3: Rechnerunterstützte Fahrplankonstruktion mit FAKTUS 23
Abb. 4: Regelkreis der Zugüberwachung (aus [62]) 25
Abb. 5: Konzept einer RZü (aus [7]) 38
Abb. 6: Konfiguration einer RZü-Zentrale (aus [7]) 39
Abb. 7: Zeit-Weg-Linien-Darstellung (aus [16]) 41
Abb. 8: Streckenspiegel-Darstellung (aus [16]) 42
Abb. 9: Bedienplatzsystem BPS 901 (aus [33]) 46
Abb. 10: Leitsysteme der Betriebsführung 50
Abb. 11: Knotenübersicht (Anschlußgraphik) 59
Abb. 12: Betriebsführungssysteme der SBB (aus [108]) 62
Abb. 13: Graphische Darstellungen aus SURF 64
Abb. 14: Bahnhofsübersicht 64
Abb. 15: Verfahren nach Patent von SCHWANHÄUßER 99
Abb. 16: Elemente der Sperrzeit 101
Abb. 17: Beispiel eines SPURPLAN-Graphen 102
Abb. 18: Belegungsmatrix 117
Abb. 19: Überholungsabschnitt 122
Abb. 20: Überholungsabschnitt bei gleichen Haltebahnhöfen 123
Abb. 21: Überholungsabschnitt bei unterschiedlichen Haltebahnhöfen 124
Abb. 22: Mindestzugfolgezeit („langsam – schnell“) 126
Abb. 23: Mindestzugfolgezeit („schnell – langsam“) 126
Abb. 24: Mindestzugfolgezeit (kreuzende Züge) 126
Abb. 25: Mindestzugfolgezeit (trennende Zugfahrten) 127
Abb. 26: „Mindestzugfolgezeit“ (kreuzende Zugfahrten) 128
Abb. 27: „Mindestzugfolgezeit“ (kreuzende Zugfahrten, negativ) 128

Abb. 28: „Mindestzugfolgezeit“ (vereinigende Zugfahrten) 129
Abb. 29: Zeitdifferenzen für das Entscheidungskriterium 130
Abb. 30: Erweiterung des Überholungsabschnitts 135
Abb. 31: Ablaufdiagramm 136
Abb. 32: kurzzeitige synchrone Vorgehensweise (Konflikt) 137
Abb. 33: kurzzeitige synchrone Vorgehensweise (Konfliktlösung) 138
Abb. 34: Ereignisorientierte Prozeßkommunikation 145
Abb. 35: Ablaufdiagramm 146
Abb. 36: Hauptfenster ASDIS/L 149
Abb. 37: ASDIS-Parameter 150
Abb. 38: Sperrzeitentreppen des Dispositionsfahrplans 151
Abb. 39: Dispositionsmaßnahmen einer Konfliktlösung 152
Abb. 40: Konfliktlösung mit Sperrzeitentreppen 152
Abb. 41: ZLM-Parameter 153
Abb. 42: Hauptfenster ZLM 154

10 Abkürzungsverzeichnis

AFI	Automatische Fahrzeugidentifikation
ALFA	Analytische Leistungsfähigkeitsberechnung von Fahrstraßenknoten
ANKE	Analytische Netzkapazitätsermittlung
ASDIS	Asynchrone Disposition
BABSI	Bahnbetriebssimulation, asynchrones Simulationsverfahren vom VIA, RWTH Aachen (in Entwicklung)
BFO	Bahnhofsfahrordnung
BLZ	Betriebsleitzentrale
BZ	Betriebszentrale
BZA	Bundesbahnzentralamt
DB	Deutsche Bundesbahn
DB AG	Deutsche Bahn AG
ESTW	Elektronisches Stellwerk
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
ETCS	European Train Control System
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FAKTUS	Fahrplankonstruktion und -untersuchung
GSIM	siehe NSIM
GSM-R	Global System for Mobile Communications - Railways
GSU	Graphische Streckenübersicht
IFB	Interaktive Fahrplan Bearbeitung
LeiDa-S	Leitsystem der Betriebsführung Zentrale Datenhaltung – Systemdaten
LeiDa-F	Leitsystem der Betriebsführung Zentrale Datenhaltung – Fahrplanbearbeitung
LeiDis-N	Leitsystem der Betriebsführung – Netzdisposition
LeiDis-S/K	Leitsystem der Betriebsführung – Streckendisposition/Knotendisposition
LeiBIT	Leitsystem Betriebliche Informationsverteilung

NLZ	Netzleitzentrale
NSIM	asynchrones Simulationsverfahren von ISW & Partner
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
özF	örtlich zuständiger Fahrdienstleiter
RailSYS	siehe SIMU ++
RSTW	Relaisstellwerk
RUT	Rechnerunterstütztes Trassenmanagement
RZü	Rechnerunterstützte Zugüberwachung
SIMU VII	synchrones Simulationsverfahren von IVE, TU Hannover
SIMU ++	synchrones Simulationsverfahren von RMCon
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
STRESI	asynchrones Simulationsverfahren von ISW & Partner
SSP	Streckenspiegel
SURF	Système Unifié de Régulation Ferroviaire
SYFA	System Fahrplan
z_{ij}	Mindestzugfolgezeit (Zugfolgefall i – j)
Zlr	Zuglenker
Zü	Zugüberwachung
ZWL	Zeit-Weg-Linie

11 Literaturverzeichnis

[1] **Antscher, M.:** Einführung von GSM-R bei den europäischen Bahnen
in: Signal + Draht, 91 (1999), Heft 6, S. 5 – 7

[2] **Arbeitsgemeinschaft der Partner Alcatel Austria AG, Wien und der Standard Elektrik Lorenz AG, Stuttgart:** Rechnergestützte Zugüberwachung für die neue Bahn
1990

[3] **Baars, J.; Brünger, O.:** Von der Trassenplanung zur Bestellung
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 48 (1999), Heft 10, S. 662 – 667

[4] **Barke, S.; Heike, H.:** Leitsysteme von Siemens für Betriebszentralen
in: Signal + Draht, 93 (2001), Heft 4, S. 5 – 11

[5] **Barner, H.; Schattanik, A.:** Rechnerunterstützte Zugüberwachung
in: Signal + Draht, 75 (1983), Heft 4, S. 59 – 61

[6] **Bär, M.:** Planungs- und Dispositionssysteme für den Bahnbetrieb – Anforderungen an die weitere Entwicklung rechnerunterstützter Lösungen
in: Der Eisenbahningenieur, 49 (1998), Heft 3, S. 19 – 26

[7] **Beyersdorf, R.:** Die Rechnerunterstützte Zugüberwachung
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 29 (1980), Heft 11, S. 769 – 772

[8] **Bieber, E.; Bleser, L.:** Interaktive Fahrplanbearbeitung (IFB)
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 38 (1989), Heft 7-8, S. 487 – 493

[9] **Bier, H.:** Digitaler Mobilfunk bei der DB AG – GSM-R ersetzt analoge Funksysteme
in: Der Eisenbahningenieur, 51 (2000), Heft 5, S. 20 – 23

[10] **Blendinger, C.; Mehrmann, V.; Steinbrecher, A.; Unger, R.:** Numerical simulation of train traffic in large networks via time-optimal control
Technical Report 722-01, Preprint-Reihe des Instituts für Mathematik der Technischen Universität Berlin, 2002

[11] **Bormet, J.**: Funktion der fahrplanbasierten Zuglenkung für Betriebszentralen
in: Der Eisenbahningenieur, 53 (2002), Heft 6, S. 36 – 44

[12] **Brünger, O.:** Konzeption einer Rechnerunterstützung für die Fahrplankonstruktion von Eisenbahnfahrplänen
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 51 (1995)

[13] **Brünger, O.:** Verfahren zur Simulation des Eisenbahnbetriebes und ihre Anwendungsbereiche
in: VDI Berichte Nr. 1219, 1995, S. 393 – 412

[14] **Brünger, O.:** Instrumente für das Konstruieren qualitativ hochwertiger Fahrpläne – heute, morgen und in Zukunft –
Vortrag an der Hochschule für Verkehrs- und Nachrichtenwesen Žilina, Slowakei, 1998

[15] **Brünger, O.:** Fahrplanfeinkonstruktion mit Rechnerunterstützung – Grundlagen, Meilensteine und Visionen
in: Informationstechnik bei den Bahnen, Edition ETR, 2000, S. 148 – 154

[16] **BZA München:** Vorläufiges Pflichtenheft für Rechnerunterstützte Zugüberwachung, Teilheft 2 RZü-Arbeitsplatz; Mensch-Rechner-Kommunikation
Pflichtenheft RZü, Ausgabe 27.08.1986

[17] **Deutsche Bahn AG:** Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung (EBO)
DS 300, Ausgabe 1992

[18] **Deutsche Bahn AG, Geschäftsbereich Netz:** Leitsystem der Betriebsführung Zentrale Datenhaltung – Fahrplanbearbeitung (LeiDa-F)
Lastenheft Entwurf, Stand E11/97

[19] **Deutsche Bahn AG, Geschäftsbereich Netz:** Leitsystem der Betriebsführung Zentrale Datenhaltung – Systemdaten (LeiDa-S)
Lastenheft Entwurf, Stand E11/97

[20] **Deutsche Bahn AG, Geschäftsbereich Netz:** Leitsystem der Betriebsführung Netzdisposition (LeiDis N)
Lastenheft Entwurf, Stand E01/98

[21] **Deutsche Bahn AG, Geschäftsbereich Netz:** Leitsystem der Betriebsführung Streckendisposition/Knotendisposition (LeiDis S/K)
Lastenheft Entwurf, Stand: E01/98

[22] **DB Netz AG, Deutsche Bahn Gruppe:** Trassenmanagement, Richtlinie R 402
Frankfurt am Main (2000)

[23] **DB Netz AG, Deutsche Bahn Gruppe:** Fahrwegkapazität, Richtlinie R 405
Frankfurt am Main (1999), Stand: 01.12.1999

[24] **DB Netz AG, Deutsche Bahn Gruppe:** Züge fahren und Rangieren – Fahrdienstvorschrift, DS/DV 408
Frankfurt am Main (Bekanntgabe 22a/Berichtigung 17a, 2001)

[25] **DB Netz AG, Deutsche Bahn Gruppe:** Betriebszentralen DB Netz AG, Richtlinie R 420
Frankfurt am Main (2. Aktualisierung, 2002)

[26] **Deutsche Bundesbahn:** Fahrdienstvorschrift DS 408
Mainz (Bekanntgabe 18, 1996)

[27] **Deutsche Bundesbahn:** Betriebsleitstellenvorschrift (BLSV) DS 424
Mainz (Bekanntgabe 3, 1993)

[28] **Ecke, J.; Kant, M.:** Umsetzung des Konzeptes der Betriebszentralen in Frankfurt/M.
in: Signal + Draht, 91 (1999), Heft 5, S. 27 – 30

[29] **Fay, A.:** Wissensbasierte Entscheidungsunterstützung für die Disposition im Schienenverkehr – eine Anwendung von Fuzzy-Petrinetzen
Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 386, 1999

[30] **Fay, A.:** Dezentrale Steuerung des Schienenverkehrs durch autonome Agenten
in: Signal + Draht, 92 (2000), Heft 3, S. 14 – 18

[31] **Filip, A.; Mocek, H.; Bazant, L.:** Zugortung auf GPS/GNSS-Basis für sicherheitskritische Anwendungen
in: Signal + Draht, 93 (2001), Heft 5, S. 16 – 21

[32] **Forstreuter, H.; Meinicke, H.:** Weiterentwicklung des BPS 901 zum integrierten Arbeitsplatz
in: Signal + Draht, 89 (1997), Heft 1-2, S. 26 – 31

[33] **Grabs, M.:** LeiBIT – Betriebliche Informationsverteilung beim Geschäftsbereich Netz
in: Signal + Draht, 90 (1998), Heft 5, S. 13 – 18

[34] **Grabs, U.:** Konflikterkennung und -lösung für dispositive Aufgaben in Betriebszentralen
in: Signal + Draht, 87 (1995), Heft 7-8, S. 254 – 258

[35] **Gröger, T.:** Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 60 (2002)

[36] **Grube, W.; Hoeft, M.:** Die Kommunikationsstruktur der Betriebszentrale Magdeburg
in: Signal + Draht, 88 (1996), Heft 6, S. 5 – 10

[37] **Happel, O.**: Sperrzeiten als Grundlage für die Fahrplankonstruktion
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 8 (1959), Heft 2, S. 79 – 90

[38] **Hauptmann, D.; Kaminsky, R.; Radtke, A.:** Integrierte Planung des Eisenbahnbetriebs mit SIMU ++
in: Signal + Draht, 91 (1999), Heft 7-8, S. 5 – 9

[39] **Hauptmann, D.:** Automatische und diskriminierungsfreie Ermittlung von Fahrplantrassen in beliebig großen Netzen spurgeführter Verkehrssysteme
Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 54 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –betrieb der Universität Hannover, 2000

[40] **Hayoz, H.:** Leittechnik bei den SBB – Stand und Weiterentwicklung
in: Signal + Draht, 84 (1992), Heft 11, S. 337 – 343

[41] **Hille, P.:** Konzepte und Strategien für KOBS
in: Signal + Draht, 89 (1997), Heft 9, S. 18 – 22

[42] **Hille, P.:** Konfliktlösungsmodelle
in: Signal + Draht, 91 (1999), Heft 3, S. 15 – 18

[43] **Hoffmann, J.; Hrivnák, I.**: Die Leitzentrale der MÁV für die Strecke Budapest – Hegyeshalom – neue Konzepte in der Betriebsleittechnik
in: Signal + Draht, 89 (1997), Heft 5, S. 28 – 31

[44] **Hörstel, J.; Klahn, V.; Hauptmann, D.:** Interaktive Fahrplankonstruktion mit dem Simulationsmodell SIMU VII
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 42 (1993), Heft 9, S. 589 – 593

[45] **Hundt, R.; Neustock, H.-H.:** Rechnerunterstützte Zugüberwachung in Köln und Hannover
in: Signal + Draht, 82 (1990), Heft 7-8, S. 141 – 144

[46] **Hundt, R.:** Automatische Konflikterkennung in der Zugüberwachung
in: Signal + Draht, 85 (1993), Heft 5, S. 140 – 142

[47] **Hundt, R.:** Automatische Konflikterkennung und -lösung dispositiver Aufgaben in der Betriebsleittechnik
in: Signal + Draht, 87 (1995), Heft 12, S. 437 – 439

[48] **Jacobs, J.:** Automatische Disposition des Eisenbahnbetriebes in Betriebszentralen auf der Basis des Rechnerunterstützten Trassenmanagements
in: “Werkzeuge für Planung und Führung des Bahnbetriebes“, Beiträge zum 3. Eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Kolloquium vom 30. und 31. März 2000 in Aachen, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes, Heft 57 (2000), S. 135 – 148

[49] **Jochim, H. E.:** Verkehrswirtschaftliche Ermittlung von Qualitätsmaßstäben im Eisenbahnbetrieb
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 54 (1999)

[50] **Kant, M.:** Erfahrungen bei der Inbetriebnahme der ersten Betriebszentrale in Frankfurt/M.
in: Signal + Draht, 92 (2000), Heft 10, S. 37 – 39

[51] **Kant, M.:** Potenziale der Betriebsleittechnik am Beispiel der Betriebszentralen der DB AG
in: Jahrbuch des Bahnwesens Nah- und Fernverkehr, Hestra-Verlag, 2000, S. 100 – 105

[52] **Kant, M.**: Steuerung von elektronischen Stellwerken und Relaisstellwerken aus Betriebszentralen
in: Der Eisenbahningenieur, 53 (2002), Heft 7, S. 46 – 49

[53] **Kempfert, O.:** Rechnerunterstützte Zugüberwachung (RZü)
in: Internationales Verkehrswesen, 39 (1987), Heft 9-10, S. 368 – 371

[54] **Kempfert, O.:** Rechnerunterstützte Zugüberwachung System PHILIPS
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 39 (1990), Heft 3, S. 133 – 137

[55] **Klahn, V.:** Die betriebliche Simulation von Eisenbahnstrecken
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 41 (1992), Heft 3, S. 163 – 170

[56] **Klahn, V.:** Graphentheoretische Grundlagen zur Abbildung großer Eisenbahnbereiche
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 41 (1992), Heft 10, S. 659 – 664

[57] **Klahn, V.:** Die Simulation großer Eisenbahnnetze
Dissertation, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 41 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und –betrieb der Universität Hannover, 1994

[58] **Klahn, V.:** Die betriebliche Simulation großer Eisenbahnnetze
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 43 (1994), Heft 10, S. 667 – 672

[59] **Koch, W.**: A low cost tool for rescheduling in regional public transport systems
in: IFAC 9th Symposium on Control in Transportation Systems, Braunschweig, 2000, S. 317 – 322

[60] **Kolb, J.-J.:** Die Betriebszentrale – ein wirtschaftliches Betriebsführungsinstrument
in: Der Eisenbahningenieur, 47 (1996), Heft 3, S. 51 – 55

[61] **Kollmannsberger, F.:** RZÜ – Rechnerunterstützte Zugüberwachung
in: Elektrische Bahnen, 83 (1985), Heft 7, S. 221 – 226

[62] **Kollmannsberger, F.:** Drahtlose Zukunft (Europas Bahnen steigen auf Mobilfunk um)
in: BahnTech 2/97, S. 12 – 15

[63] **Kollmannsberger, F.:** Forschung und Technologie: Potentiale der Betriebsleitsysteme
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 47 (1998), Heft 10, S. 595 – 600

[64] **Kretschmer, W.; Dannenberg, H.; Habich, G.; Oldenbürger, H.-D.:** Eisenbahnbetriebsuntersuchungen mit Hilfe des Simulationsmodells SIMU V
in: AET – Archiv für Eisenbahntechnik, 39 (1984), S. 33 – 37

[65] **Kuhbier, M.:** Rechnerunterstützte Zugüberwachung bei der Bundesbahndirektion Nürnberg
in: Internationales Verkehrswesen, 42 (1990), Heft 2, S. 94 – 98

[66] **Lemm, U.:** Rechnerunterstützte Zugüberwachung bei der Bundesbahndirektion Köln
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 36 (1987), Heft 4, S. 222 – 229

[67] **Leoff, M.; Lorenz, F.; Sauer, W.:** Interaktive Fahrplan-Bearbeitung
in: Die Deutsche Bahn, 1992, Heft 11, S. 1229 – 1232

[68] **Lindner, H. R.; Overrath, H.; Bürger, R.; Weiß, G.:** Der Fahrplan, allgemeines Basiswissen und Grundsätze
Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg Mainz, 1984

[69] **Manteuffel, K; Seiffart, E.:** Einführung in die lineare Algebra und lineare Optimierung
Verlag Chemie GmbH Weinheim/Bergstraße, 1970

[70] **Martin, U.:** Verfahren zur Bewertung von Zug- und Rangierfahrten bei der Disposition
Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig, Heft 52 (1995)

[71] **Martin, U.:** Die dispositive Lösung von Fahrweg- und Belegungskonflikten als Voraussetzung für eine automatische Betriebssteuerung spurgeführter Verkehrssysteme
in: Leipzig Annual Civil Engineering Report No. 3, Universität Leipzig, 1998, S. 311 – 332

[72] **Metha, S.:** Programmpaket zur asynchronen Simulation des Eisenbahnbetriebes
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswirtschaft, Eisenbahnbau und -betrieb der RWTH Aachen (1992)

[73] **Mura, S.; Schaal, M.:** Zugnummernmeldeanlage ZN L2000 und Zuglenkung ZL L2000 im BZ-Konzept
in: Signal + Draht, 94 (2002), Heft 6, S. 22 – 26

[74] **Oser, U.; Roth, W.:** Informationssysteme zur Überwachung, Disposition und Steuerung des Zugbetriebs
in: Die Bundesbahn, 1989, Heft 11, S. 985 – 991

[75] **Oser, U.; Thorwath, W.; Biernatzki, F.:** Betriebszentralen – Eine neue systemtechnische Lösung für das Netz der Deutschen Bahn AG
in: Der Eisenbahningenieur, 45 (1994), Heft 12, S. 859 – 866

[76] **Pachl, J.**: Steuerlogik für Zuglenkanlagen zum Einsatz unter stochastischen Betriebsbedingungen
Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig, Heft 49 (1993)

[77] **Pachl, J.:** Systemtechnik des Schienenverkehrs
2. Auflage, Teubner Verlag Stuttgart, 2000

[78] **Parádi, F.; Szilva, P. E.**: Konflikterkennung und -lösung durch dynamische Zuglenkung
in: Signal + Draht, 90 (1998), Heft 3, S. 26 – 27

[79] **Pauly, A.; Elbeshausen, E.:** Grafiksysteme für die Rechnerunterstützte Zugüberwachung
in: AET – Archiv für Eisenbahntechnik, 39 (1984), S. 49 – 54

[80] **Peckmann, P.:** Das Zuglenksystem ZLS 901 – ein Automatisierungssystem
in: Signal + Draht, 89 (1997), Heft 10, S. 12 – 16

[81] **Peckmann, P.:** Zugnummernmeldesystem und Zuglenksystem für Betriebszentralen
in: Signal + Draht, 92 (2000), Heft 12, S. 42 – 45

[82] **Pferdmenges, S.; Schaefer, H.**: Automatische Konflikterkennung und wissensbasierte Konfliktlösung in der Streckendisposition
in: Signal + Draht, 87 (1995), Heft 5, S. 174 – 177

[83] **Pohlmann, P.**: Betriebszentralen- und ESTW-Planungen der DB Netz AG
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 51 (2002), Heft 7/8, S. 410 – 416

[84] **Puhlmann, J.; Hoffmann, H.-G.:** Konzept für einen Technologenarbeitsplatz „Fahrplanbearbeitung“
in: Eisenbahnpraxis, 33 (1989), Heft 4, S. 135 – 136

[85] **Sauer, W.:** RUT – Rechnerunterstützte Trassenkonstruktion
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 48 (1999), Heft 11, S. 720 – 725

[86] **Schmidt, M.; Winter, J.:** Anforderungen der GPS-basierten Ortung an den digitalen Streckenatlas
in: Signal + Draht, 92 (2000), Heft 4, S. 12 – 17

[87] **Schröder, P.:** Konzept für die Verbesserung des asynchronen Algorithmus zur automatischen Konfliktlösung auf eingleisigen Strecken
Diplomarbeit am Institut für Straßen- und Schienenverkehr, Fachgebiet Schienenfahrzeuge und Bahnbetrieb der TU Berlin (angefertigt am Lehrstuhl für Verkehrswirtschaft, Eisenbahnbau und -betrieb der RWTH Aachen), 1998

[88] **Schütz, H.:** Der Belegblattdrucker als Mittel zur Verbesserung von Betriebsführung und Betriebsleitung
in: Signal + Draht, 58 (1966), Heft 6, S. 86 – 94

[89] **Schultze, K.:** Modell für die asynchrone Simulation des Betriebes in Teilen des Eisenbahnnetzes
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 38 (1985)

[90] **Schultze, K.:** Erläuterungen zum Simulationsverfahren NSIM
Aachen (1998)

[91] **Schwanhäußer, W.:** Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes, Heft 20 (1974)

[92] **Schwanhäußer, W.:** Die asynchrone Simulation des Eisenbahn-Betriebes
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 34 (1985), Heft 11, S. 835 – 836

[93] **Schwanhäußer, W.:** Verfahren zur Steuerung und Sicherung eines fahrplangebundenen Verkehrssystems
Deutsches Patent- und Markenamt, Offenlegungsschrift DE 197 26 542 A, Anmeldenummer 3010244 vom 07.05.1997

[94] **Schwanhäußer, W.; Gröger, T.:** Analyse ausgewählter Simulationsmodelle für den Schienenverkehr
Forschungsprojekt „Situationsanalyse über den Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen“ des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, 1997

[95] **Schwanhäußer, W.; Gast, I.; Schultze, K.; Wakob, W.; Brünger, O.; Mehta, S.:** Programmfamilie SLS – STRESI, STRELE, ALFA – PC-Programme zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Simulation Benutzerhandbuch, Version 4.98, Aachen (2001)

[96] **Schwanhäußer, W.; Jacobs, J.:** Disposition des Eisenbahnbetriebes durch laufende Wiederholung der Fahrplankonstruktion als PC-Laborversion (Asynchrone Disposition)
Forschungsarbeit für die Transport-, Informatik- und Logistik-Consulting GmbH, Dezember 2000

[97] **Scotland, R.:** Die Betriebsleitung – historisch gewachsen
in: Die Bundesbahn, 1974, Heft 10, S. 787 – 789

[98] **Sitzmann, E.; Günther, H.:** Betriebsleitzentralen für die Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 35 (1986), Heft 1-2, S. 73 – 79

[99] **Suwe, K.-H.:** Rechnerunterstützte Zugüberwachung (RZü)
in: Der Eisenbahningenieur, 31 (1982), Heft 12, S. 515 – 518

[100] **Vakhtel, S.:** Rechnerunterstützte analytische Ermittlung der Kapazität von Eisenbahnnetzen
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 59 (2002)

[101] **Wakob, Helmut:** Ableitung eines generellen Wartemodells zur Ermittlung der planmäßigen Wartezeiten im Eisenbahnbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Aspekte Leistungsfähigkeit und Anlagenbelastung
Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der RWTH Aachen, Heft 36 (1985)

[102] **Wendler, E.**: Weiterentwicklung der Sperrzeitentreppe für moderne Signalsysteme
in: Signal + Draht, 87 (1995), Heft 7-8, S. 268 – 273

[103] **Wendler, E.:** Knotenpunkte und Netze von Bahnen
Umdruck des Lehrstuhls für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der RWTH Aachen, 2001

[104] **Wendler, E.**: Bemessung und Gestaltung von Eisenbahnbetriebsanlagen – Teil 1: Eisenbahnbetriebswissenschaft
Umdruck des Lehrstuhls für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der RWTH Aachen, 2001

[105] **Wendler, E.:** Quality management in the operation planning process by means of harmonized modelling
in: Proc. of the Word Congress on Railway Research (WCRR), Köln (2001)

[106] **Wendler, E.:** Bemessungsmethoden für große Eisenbahnknoten
in: Eisenbahntechnische Rundschau, 51 (2002), Heft 7-8, S. 418 – 424

[107] **Winter, P.:** Moderne Betriebsleit- und Sicherungstechnik für die Bahn 2000 und NEAT
in: Eisenbahn-Revue International, 1997, Heft 7-8, S. 344 – 350

[108] **Winter, P.:** Vereinheitlichung der Zugbeeinflussung (Das Projekt ETCS der UIC für die europaweite Vereinheitlichung der Zugbeeinflussung)
in: Der Eisenbahningenieur, 49, (1998), Heft 3, S. 11 – 14

[109] **Winter, P.:** Europäische Signal- und Telekommunikationssysteme – heutiger Stand und Tendenzen
in: Rail International – Schienen der Welt, 1998, Heft 6, S. 15 – 24

[110] **Winter, P.:** Europäische Betriebsleittechnik mit ERTMS/ETCS – konkrete Anwendungen bei den SBB
in: Jahrbuch des Bahnwesens (47), 1998, S. 72 – 83

[111] **Wittmann, K.:** GSM-R – Die Einführung digitaler Mobilkommunikation bei den Bahnen
in: Signal + Draht, 90 (1998), Heft 12, S. 29 – 30

Lebenslauf

Angaben zur Person	
Name	Jürgen Jacobs
Geburtsdatum	08.10.1965
Geburtsort	Birkesdorf j. Düren
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	ledig

Schulbildung	
8/1971 – 7/1975	Nikolaus-Schule, Städt. Gemeinschaftsschule Düren-Rölsdorf
8/1975 – 5/1984	Städt. Gymnasium am Wirteltor Düren
26.05.1984	Abitur

7/1984 – 9/1985	Grundwehrdienst

Berufsausbildung	
10/1985 – 1/1993	Studium der Informatik an der RWTH Aachen
13.01.1993	Diplom im Studiengang Informatik

Berufserfahrung	
9/1989 – 6/1992	Studentische Hilfskraft am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen
Seit 3/1993	Wissenschaftlicher Angestellter am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen